

Beitrag zur Optimierung des Spanvolumens beim industrierobergestützten Bandschleifen frei geformter Werkstücke

Von der Fakultät Maschinenbau
der TU Dortmund
zur Erlangung des Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Malik Čabaravdić
aus Zenica, Bosnien-Herzegowina

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Künne

Mitberichter: Dr.-Ing. B. Kuhlenkötter

Tag der mündlichen Prüfung:

29. Februar 2008

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1. Ausgangssituation	1
1.2. Zielsetzung der Arbeit	3
1.3. Vorgehensweise und Struktur der Arbeit	4
2. Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens	6
2.1. Definition des Bandschleifens	6
2.2. Wichtigste Kenngrößen des Schleifens	6
2.3. Prozessvarianten beim Bandschleifen	8
2.3.1. Prozessvarianten nach DIN 8589-12	8
2.3.2. Nicht normierte Prozessvarianten	10
2.4. Schleifbandaufbau	12
2.5. Schleifmittel	14
2.6. Elastische Kontaktscheibe	15
2.6.1. Härte des Laufpolsters	15
2.6.2. Material des Laufpolsters	16
2.6.3. Gestaltung des Laufpolsters	16
2.6.4. Umfangsgeschwindigkeit der Kontaktscheibe	18
2.7. Prozessmodelle für das Schleifen in der Forschung	18
2.7.1. Experimentelle Untersuchungen des Schleifens mit elastischem Werkzeug ...	18
2.7.2. Inverses Modell für das Bandschleifen von Meyerhoff	20
2.7.3. Finite-Elemente Modell für das Stirnschleifen von Hammann	20
2.7.4. Finite-Elementen Modell für das Bandschleifen von Schüppstuhl	22
2.8. Globale und lokale Analyse der Bandschleifprozesse	23
2.8.1. Globale Prozessmodellierung des Bandschleifens mit elastischer Kontaktscheibe	23

Inhaltsverzeichnis

2.8.2.	Lokale Prozessmodellierung des Bandschleifens mit elastischer Kontaktscheibe	24
3.	Automatisierung der Bandschleifprozesse	26
3.1.	Industrierobotergerstütztes Bandschleifen	26
3.2.	Roboterprogrammiersysteme	30
3.3.	Stand der Technik im Bereich der Offline-Programmier- und Simulationssysteme	31
3.3.1.	FAMOS robotic Offline-Programmiersystem	33
3.3.2.	DirectControl Roboterprogrammier- und Steuerungssystem	34
3.4.	Beispiel einer automatisierten Arbeitszelle für das industrierobotergerstützte Bandschleifen und Polieren von Sanitärarmaturen	35
4.	Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells	38
4.1.	Die Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Berechnung der Andruckverteilung	38
4.1.1.	Behandlung der Kontaktprobleme – Signorini Problem	38
4.1.2.	Das Konzept der Finite-Elemente-Methode (FEM)	41
4.1.2.1	<i>Diskretisierung bei der FEM-Berechnung der Andruckverteilung</i>	42
4.1.2.2	<i>Randbedingungen</i>	44
4.1.2.3	<i>Erstellung des (Un)gleichungssystems</i>	46
4.1.2.4	<i>Lösung des Systems und Berechnung der Spannungen und Knotenkräfte</i> ...	46
4.2.	Experimentelle Ermittlung der elastischen Werkstoffkenngrößen eines Werkzeugs	48
4.2.1.	Versuchsaufbau	48
4.2.2.	Kalibrierungsversuche	50
4.2.3.	Verifikationsversuche	51
5.	Untersuchung der Störgrößen bei der Modellierung des Bandschleifprozesses	56
5.1.	Einrichtung der Versuchszelle für die Verschleißversuche	56
5.2.	Verschleißbetrachtungen	58
5.3.	Wärmeeinfluss	59
5.4.	Messsystemfehler als Störungsgröße bei der Prozessmodellierung	64
5.5.	Andruckkraftschwankungen	66
5.6.	Minimierung des Einflusses der Störgrößen	67
6.	Modellierung lokaler Zusammenhänge mit Hilfe statistischer Versuchsplanung	68
6.1.	Statistische Versuchspläne für die Modellbildung	69

6.2.	Aufstellung des Versuchsplans für die Modellierung der lokalen Zusammenhänge.....	69
6.2.1.	Festlegung der Einfluss- und Störgrößen	70
6.2.2.	Wertebereiche für die Einflussgrößen	71
6.2.3.	Screening-Plan.....	72
6.2.4.	Modellierungsplan	74
6.3.	Versuchsaufbau	74
6.4.	Durchführung der Versuchsserie.....	76
6.5.	Auswertung der Versuchsergebnisse	78
6.5.1.	Auswertung des Screening-Plans	78
6.5.2.	Auswertung des Modellierungsplans.....	85
6.5.2.1	<i>Auswertung des Modellierungsplans für Baustahl St37</i>	85
6.5.2.2	<i>Auswertung des Modellierungsplans für Messing</i>	89
6.6.	Einflüsse der wichtigsten Prozessparameter auf den Abtrag	90
6.6.1.	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit.....	93
6.6.2.	Einfluss des lokalen Andrucks.....	94
6.6.3.	Einfluss der Schleifzeit	96
6.6.4.	Einfluss der Körnung des Schleifbandes	97
6.6.5.	Einfluss der Kontaktlänge.....	97
6.6.6.	Einfluss des Radius des Werkzeugs	98
6.6.7.	Einfluss der Bandspannung	99
6.6.8.	Einfluss des Werkstoffs des Werkstücks.....	99
6.6.9.	Verifikation des Modells der lokalen Zusammenhänge	100
7.	Anwendungen des Bandschleifmodells in der Praxis	101
7.1.	Simulation der Bandschleifprozesse	101
7.1.1.	Prinzipieller Ablauf der Prozesssimulation	101
7.1.2.	Verifikation der Simulationsergebnisse.....	102
7.2.	Ein Konzept zur prozessmodellbasierten Kraftregelung des Roboters beim Bandschleifen	105
7.2.1.	Kraftgeführtes Bandschleifen	106
7.2.2.	Prozessvorplanung.....	108
7.2.3.	Bestimmung der Vorgabekraft	109
7.2.4.	Integration in das Roboterprogrammier- und Steuerungssystem	109

Inhaltsverzeichnis

7.2.5.	Anwendbarkeit der Kraftregelung beim Schleifen der Werkstücke mit 2-fach gekrümmter Oberfläche	10610
7.2.6.	Kraftregelung beim Bandschleifen eines realen Werkstücks mit komplexer Geometrie der Oberfläche.....	10815
7.3.	Ein Konzept zur Anwendung der Prozesssimulation beim Nachschleifen von Werkstücken mit fehlerhafter Oberfläche	118
8.	Zusammenfassung und Ausblick	119
	Literaturverzeichnis.....	11923

Formelzeichen

a_e (mm)	Arbeitseingriff
a_i (mm)	Abtragstiefe eines finiten Elements
a_{lok} (mm)	lokaler Abtrag
\dot{a}_{lok} (mm/s)	lokale Abtragsgeschwindigkeit
a_p (mm)	Schnitteingriff
A_s (mm ²)	Schleiffläche (Kontaktfläche)
A_w (mm ²)	Eingriffsquerschnitt
a_{uk} (mm)	unkorrigierter Abtrag
B (mm)	Breite des Werkstücks
d_j	Halbspanne des Wertebereichs von X_j
d_{wz} (mm)	Durchmesser des Werkzeugs
E (N/mm ²)	Elastizitätsmodul
$[E]$	Elastizitätsmatrix
$[F]_e$	Matrix der Kräfte in den Knoten eines finiten Elements
F_G, F_b, F_A, F_k (N)	Kontaktkraft (Anpresskraft)
F_x, F_y, F_z (N)	Kräfte in drei Raumrichtungen
$[G]$	Abstandsmaßmatrix
g (mm)	Abstandsmaß
$[K]$	Steifigkeitsmatrix eines elastischen Körpers
K_A, K_l (-)	werkstoffspezifische Abtragskonstante
$[K]_e$	Steifigkeitsmatrix eines finiten Elements
K_q (-)	körnungsspezifische Abtragskonstante
k_t (-)	Standzeitfaktor des Schleifbands
k_{wz} (-)	Körnung des Schleifbandes
K_y (mm ⁻¹)	Längskrümmung

Formelzeichen

K_z (mm ⁻¹)	Querkrümmung
$\mathcal{J}, \Delta W$ (J)	totale potenzielle Energie
l_e (mm)	Länge eines finiten Elements
l_s (mm)	Schleiflänge (Kontaktlänge)
LT_n (mm)	Messwert des Laserabstandssensors nach dem Schleifen
LT_v (mm)	Messwert des Laserabstandssensors vor dem Schleifen
l_{ws} (mm)	Werkstücklänge
Mat (-)	Werkstoff des Werkstücks
m_j	Mitte des Wertebereichs von X_j
MT_n (mm)	Messtasterwert nach dem Schleifen
MT_v (mm)	Messtasterwert vor dem Schleifen
M_x, M_y, M_z (N/m)	Momente in drei Raumrichtungen
$[N]_e$	Ansatzfunktionen eines finiten Elements
p (N)	äußere Kräfte
$[P]$	Matrix der äußeren Kräfte
q_{lok} (N/mm ²)	lokaler Andruck
Q_w (mm ³ /s)	Zeitspanvolumen
Q'_w (mm ² /mm·s)	bezogenes Zeitspanvolumen
q_{wz} (N/mm ²)	Bandspannung
PF (mm)	Positionierungsfehler
R^2	Bestimmtheitsmaß
R^2_{adj}	adjustiertes Bestimmtheitsmaß
r_{wz} (mm)	Radius des Werkzeugs
R_y (mm)	Längskrümmungsradius
R_z (mm)	Querkrümmungsradius
t_e (s)	Wirkzeit des Werkzeugs an ein finites Element
t_s (s)	Schleifzeit
u_x, u_y, u_z (mm)	Verschiebungen in drei Raumrichtungen
$[U]_e$	Matrix der Verschiebungen in den Knoten eines finiten Elements
v_s (m/s)	Schnittgeschwindigkeit
v_v (m/s)	Vorschubgeschwindigkeit
V_w (mm ³)	Spanvolumen
V'_w (mm ³ /mm)	bezogenes Spanvolumen
x (mm)	Zustellung

Formelzeichen

X_{Cj}	kodierter Einflussfaktor bei der Versuchsplanung
x_j	Einflussfaktor (nicht transformiert)
X_j	Einflussfaktor bei der Versuchsplanung
X_{jo}	obere Grenze des Wertebereichs von X_j
X_{ju}	untere Grenze des Wertebereichs von X_j
y	Zielgröße (nicht transformiert)
Y	Zielgröße bei der Versuchsplanung
\bar{y}	Mittelwert der Zielgröße (nicht transformiert)
\hat{Y}	statistischer Wert der Zielgröße (nicht transformiert)
y_i	Zielgröße y in i -tem Versuch (nicht transformiert)
Y_i	Zielgröße Y in i -tem Versuch bei der Versuchsplanung
\bar{y}_i	Mittelwert der Zielgröße in i -tem Versuch (nicht transformiert)
W_z (°)	Kippwinkel um z -Achse
α_F (°)	Fräsungswinkel der Kontaktscheibe
β_o	Schnittpunkt der Regression
β_j	Regressionskoeffizient von X_j
$\hat{\beta}_j$	statistische Werte für die Koeffizienten β_j
$\beta_{j,k}$	Effekt der Interaktion zwischen Faktor j und Faktor k
$\gamma_{xx}, \gamma_{yy}, \gamma_{zz}$ (-)	Gleitungen in drei Raumrichtungen
$[\varepsilon]_e$	Matrix der Verzerrungen eines finiten Elements
ε_i	stochastischer Fehlerterm (Rauschen) in i -tem Versuch
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ (-)	normale Verzerrungen in drei Raumrichtungen
$[\lambda]$	Matrix der Lagrange Multiplikatoren
μ (-)	Reibungskoeffizient
σ^2	Varianz
$[\sigma]_e$	Matrix der Spannungen in einem finiten Element
σ_N (N/mm ²)	normale Spannung
σ_T (N/mm ²)	tangentiale Spannung
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ (N/mm ²)	Normalspannungen in drei Raumrichtungen
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ (N/mm ²)	Schubspannungen in drei Raumrichtungen
ν (-)	Querkontraktion

Kapitel 1

Einleitung und Aufgabenstellung

1.1. Ausgangssituation

Der Bedarf an Produkten mit frei geformten Oberflächen wächst aus funktionalen und ästhetischen Gründen stetig an. Die Variante des Bandschleifens mit elastisch deformierbarer Kontaktscheibe als Wirkfläche ist besonders geeignet für die Feinbearbeitung von Freiformflächen, weil die elastischen Kontaktscheiben eine flächige Bearbeitung durch ihre Anpassung an die Werkstückoberfläche ermöglichen. Die praktische Anwendung findet das Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe z. B. in der Fertigung von Turbinenschaufeln (ansteigende Komplexität der Geometrie führt zu einem besseren Wirkungsgrad) oder in der Bearbeitung von Sanitärarmaturen (hohe ästhetische Anforderungen) [Sch03].

Bandschleifen ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Das Werkzeug besteht aus Schleifkörnern auf einer Unterlage (Schleifband), welches über mindestens zwei rotierende Rollen umläuft. Als Schleifkornmaterial werden härtere Werkstoffe, wie z. B. Normalkorund, Siliziumkarbid oder Sinterkorund verwendet. In der hier betrachteten Prozessvariante wird das zu schleifende Werkstück durch einen Roboter (industriero-botergestütztes Bandschleifen) an eine der Rollen, der Kontaktscheibe (Kontaktrolle), zuge- stellt (siehe Abbildung 1.1). Die Kontaktscheibe besteht aus Elastomer, dass auf einem Me-

tallkern aufgebracht ist. Unter nichtständiger Berührung zwischen Werkstück und Schleifkorn wird der Werkstoff abgetrennt.

Das Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe hebt sich von anderen Feinbearbeitungsverfahren (z. B. Fräsen, oder Schleifen mit starrem Werkzeug) durch größere Abtragsraten und höhere Standzeiten bei vergleichbaren Oberflächenqualitäten ab. Wegen der Formanpassung zwischen Werkstück und elastischem Werkzeug können beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe eine wesentlich höhere Kontaktfläche und höhere Andruckkräfte erzeugt werden als beim Fräsen oder beim Schleifen mit starrem Werkzeug. Dadurch können Zeitspannvolumina erzielt werden, die etwa 20mal größer als beim Fräsen oder etwa 10mal größer als beim Schleifen mit starrem Werkzeug sind [CDF02].

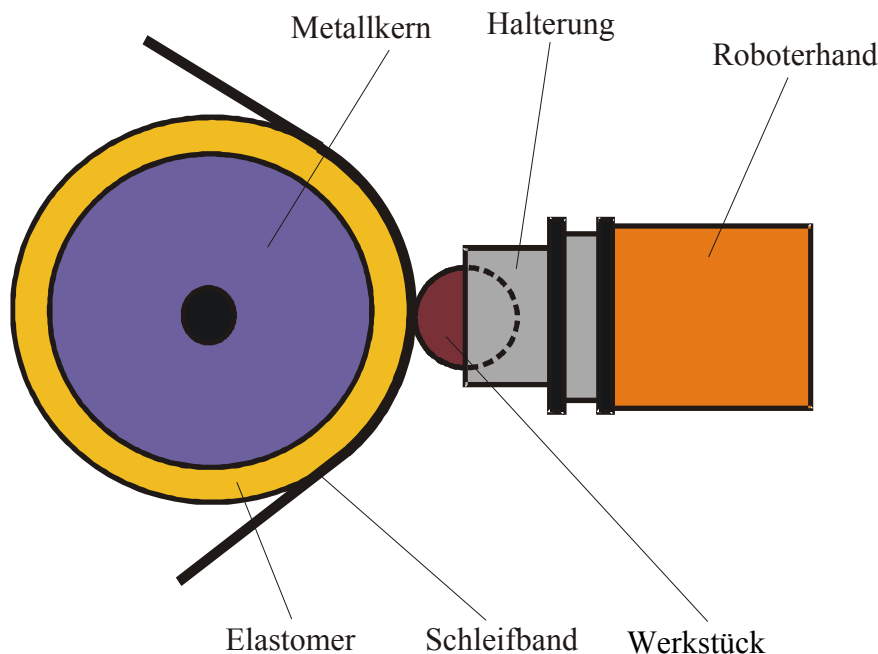


Abbildung 1.1: Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe

Weitere Vorteile dieser Prozessvariante sind [Sch03, Ham98] u. a.:

- Eine steigende Elastizität der Kontaktrolle führt zu einer besseren Formanpassung an die Oberfläche des Werkstücks, was eine höhere Qualität der Bearbeitung von Freiformflächen ermöglicht.
- Der Ausgleich von Zustellungs- und Orientierungsfehlern des Werkstücks oder Werkzeugs ist in geringem Maße möglich.
- Der Werkzeugverschleiß führt nicht zu einer Formveränderung des Werkzeugs.

Um eine höhere Wirtschaftlichkeit der Roboterlösungen beim Bandschleifen gegenüber der manuellen Bearbeitung in Billiglohnländern zu gewährleisten und um eine Verlagerung der

Schleifbearbeitung in das Ausland zu verhindern, muss der Automatisierungsgrad der bestehenden Schleifroboteranlagen in Deutschland erhöht werden. Außerdem ist eine Erhöhung der Flexibilität der Anlagen notwendig, da eine schnellere Anpassung an unterschiedliche Produkttypen einen Einsatz der flexiblen Anlagen auch bei kleinen Losgrößen, bis zur Losgröße 1, bzw. bei Produkten mit hoher Variantenvielfalt ermöglicht.

Um Mitarbeiter von körperlich schwerer, monotoner und gefährlicher Arbeit zu entlasten und die Wirtschaftlichkeit und Qualität der Fertigung zu optimieren, wird Bandschleifen durch den Einsatz von Industrierobotern automatisiert. Wegen des großen Zeit- und Arbeitsaufwands bei der Programmierung und Optimierung der Bewegungsabläufe sind die derzeit bekannten automatisierten Systeme nur bei großen Losgrößen wirtschaftlich einsetzbar. Eine Anpassung an verschiedene Teilegeometrien und Bearbeitungsabläufe erfordert meist umfangreiche Kenntnisse und kann nur von Experten ausgeführt werden.

Durch ein neues, auf einer Prozesssimulation basierendes Softwaresystem, sollen bei anspruchsvollen Bearbeitungsprozessen die Erstellung, Änderung und Optimierung von Roboterprogrammen wesentlich vereinfacht und auch verstärkt für Mitarbeiter nutzbar gemacht werden. Ein solches Softwaresystem muss ein präzises Prozessmodell für das Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe umfassen. Jedoch können sich die Kontaktverhältnisse zwischen dem Werkstück und Werkzeug sehr stark bei der Schleifbearbeitung von Freiformflächen verändern, was zu einem stark variierenden Abtrag führt. Deshalb ist es sehr aufwendig den Prozess zu modellieren.

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Die Arbeit mit dem Thema „Beitrag zur Optimierung des Spanvolumens beim industrieroboter-gestützten Bandschleifen frei geformter Werksücke“ ist in den Kontext des Projektes „Automatisierte Programmgenerierung für das industrieroboter-gestützte Bandschleifen frei geformter Oberflächen“ eingebettet. Ein übergeordnetes Ziel dieses Projektes ist es, das Programmieren für das industrieroboter-gestützte Bandschleifen effizienter zu gestalten, um den Einsatzbereich dieses Verfahrens auf die Einzel- und Kleinserienfertigung zu erweitern.

Beim Bandschleifen frei geformter Oberflächen mit einer elastischen Kontaktscheibe variieren Kontaktfläche und Andruckkraftverteilung innerhalb der Kontaktfläche in einem hohen Maße. Dies führt zu einer ähnlich inhomogenen Abtragsverteilung, deren Ausprägung für die automatisierte Freiformflächenbearbeitung bestimmt werden muss. Die genauen Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen und dem Abtrag sollen im Rahmen der Arbeit ermittelt werden. Ziel der Arbeit ist es, ein Modell für das Bandschleifen mit elastischer Kontaktschei-

be zu erstellen, das sowohl für eine Verbesserung der Abtragssimulation, als auch für eine Optimierung des Bandschleifprozesses durch eine Kraftregelung verwendet werden kann.

Zur Umsetzung der Zielsetzung ist es notwendig, für eine gegebene Kontaktsituation (Werkstück befindet sich im Eingriff) die resultierende Andruckverteilung, sowie die Abtragsverteilung am frei geformten Werkstück vorhersagen zu können. Auf Basis des Abtragsverhaltens kann dann eine Schleifbahnoptimierung durchgeführt werden.

In einem ersten Schritt soll ein schon vorhandenes FEM-Modell, das die Andruckverteilung an der Oberfläche des Werkstücks für eine Kontaktsituation anhand der geometrischen Daten berechnet, kalibriert werden. Dabei ist der Zusammenhang zwischen dem FEM-Modell und den realen Prozessen zu ermitteln, indem die unbekanntes Elastizitätsparameter (Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl) eines elastischen Werkzeugs experimentell bestimmt werden.

Im zweiten Schritt wird von einer konstanten Andruckverteilung an der Werkstückoberfläche ausgegangen, d. h. der Bandschleifprozess wird auf einer lokalen Ebene hinsichtlich der Andruckverteilung betrachtet. Dabei sollen die Einflüsse der technologischen Parameter (wie z. B. Höhe des lokalen Andrucks, Schnittgeschwindigkeit, Bandspannung, Schleifzeit) auf den Abtrag als die Ergebnisgröße des Bandschleifprozesses durch eine multifaktorielle Analyse experimentell ermittelt werden. Die ermittelten Zusammenhänge sollen mit dem Andruckverteilungsmodell kombiniert werden, um ein Abtragsverteilungsmodell zu erhalten.

1.3. Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Im Kapitel 2 wird der Stand der Technik und Forschung im Bereich des Bandschleifens mit elastischer Kontaktscheibe dargestellt. Anschließend werden die vorhandenen Ansätze bei der Modellierung des Prozesses diskutiert. Im Kapitel 3 wird die Ausgangssituation bei der Automatisierung der Bandschleifprozesse vorgestellt.

Ein schon vorhandenes statisches FEM-Modell berechnet die Andruckverteilung ausgehend von der geometrischen Kontaktsituation. Dieses Modell wurde jedoch noch nicht in der Praxis verifiziert. Deswegen werden hier zunächst einfache Geometrien (flache, zylindrische) benutzt, um die nicht bekannten Werkstoffkenngrößen des Werkzeugs experimentell zu ermitteln und um das Modell zu kalibrieren. Zur Verifikation des kalibrierten Modells dienen komplexere zweifach gekrümmte Geometrien. Im Kapitel 4 folgen eine Beschreibung des FEM-Andruckverteilungsmodells sowie die Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Kalibrier- und Verifikationsversuche.

Nachdem die lokalen statischen Andruckkräfte durch das kalibrierte FEM-Modell mathematisch bestimmt wurden, werden die lokalen Zusammenhänge modelliert. Der Schwerpunkt dieses Modells liegt in der Untersuchung von Einflüssen lokaler Kräfte und geometrisch/dynamischer Parameter. Zunächst werden die Versuche zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Störgrößen, wie z. B. Schleifbandverschleiß und Wärmeeinfluss durchgeführt, was der Inhalt von Kapitel 5 ist. Die lokalen Zusammenhänge der wichtigsten Einflussgrößen (Andruckkraft, Schnittgeschwindigkeit, Bandkörnung usw.) werden dann mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung ermittelt. Dabei werden die Einflussfaktoren auf verschiedenen Stufen eingesetzt und die Versuchsbedingungen von einem einzelnen Versuch zum anderen nach einem geeigneten Versuchsplan variiert. Durch eine Regressionsanalyse werden die Versuchsdaten an ein mathematisches Modell für die lokalen Zusammenhänge angepasst. Das Modell beschreibt mathematisch die Abhängigkeit des lokalen Abtrags von den Einflussfaktoren. Der Versuchsaufbau, die benutzten statistischen Werkzeuge und die Ergebnisse der Versuchsreihe sind die Bestandteile von Kapitel 6.

Die praktischen Anwendungen des erhaltenen Modells bei der Simulation des Bandschleifens mit elastischer Kontaktscheibe und bei der Kraftregelung des Roboters in einer automatisierten Bandschleifzelle werden im Kapitel 7 beschrieben.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 8 ab.

Kapitel 2

Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens

2.1. Definition des Bandschleifens

Das Hauptziel der Schleifbearbeitung ist die Verbesserung der Form- und Maßhaltigkeit sowie der Oberflächengüte des Werkstücks. Das Ergebnis eines Bandschleifprozesses hängt von vielen Parametern und deren Zusammenspiel ab. In diesem Kapitel werden Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens sowie die wichtigsten Kenngrößen und Einflussparameter beim Bandschleifen dargestellt.

Bandschleifen als ein Fertigungsverfahren ist nach DIN 8589-12 wie folgt definiert:

„Bandschleifen ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit einem vielschneidigen Werkzeug aus Schleifkörnern auf Unterlage (Schleifband), welches über mindestens zwei rotierende Rollen umläuft und in der Kontaktfläche durch eine dieser Rollen, ein anderes zusätzliches Stützelement oder auch ohne ein Stützelement an das zu schleifende Werkstück angepresst wird und dessen geometrisch unbestimmte Schneiden mit hoher Geschwindigkeit, unter nicht-ständiger Berührung zwischen Werkstück und Schleifkorn, den Werkstoff abtrennen“.

2.2. Wichtigste Kenngrößen des Schleifens

In der Praxis existiert eine Vielzahl von Prozessmodellen für die Schleifbearbeitung. In vielen Arbeiten wurde das Spanvolumen bei Schleifprozessen mit starren Werkzeugen untersucht.

2. Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens

Die wichtigsten Kenngrößen des Prozesses werden an dieser Stelle auf Basis eines solches Modells [TD04] kurz erläutert.

Neben der resultierenden Oberflächenrauheit ist die Spanabnahme bzw. das Spanvolumen (V_w) die wichtigste Ergebnisgröße des Schleifens. Das Spanvolumen ist ein Maß für das durch die Schleifbearbeitung zerspannte Werkstücksvolumen.

Die Produktivität und Mengenleistung wird auch durch das Zeitspanvolumen (Q_w) beschrieben, das der Differentialquotient von Spanvolumen und Zeit ist [TD04]:

$$Q_w = dV_w / dt \quad (\text{mm}^3 / \text{s}). \quad (2.1)$$

In Abbildung 2.1 sind die wichtigsten Kenngrößen des Schleifprozesses am Beispiel des Planschleifens mit starrem Werkzeug dargestellt. Im allgemeinen Fall ist das Zeitspanvolumen definiert mit [TD04]:

$$Q_w = A_w \cdot v_v, \quad (2.2)$$

wobei A_w der Eingriffsquerschnitt, und v_v die tangentielle Vorschubgeschwindigkeit ist. Im Fall des Planschleifens ergibt sich der Eingriffsquerschnitt als Produkt von Arbeitseingriff a_e und Schritzeingriff a_p (siehe Abbildung 2.1):

$$A_w = a_e \cdot a_p \quad (\text{mm}^2). \quad (2.3)$$

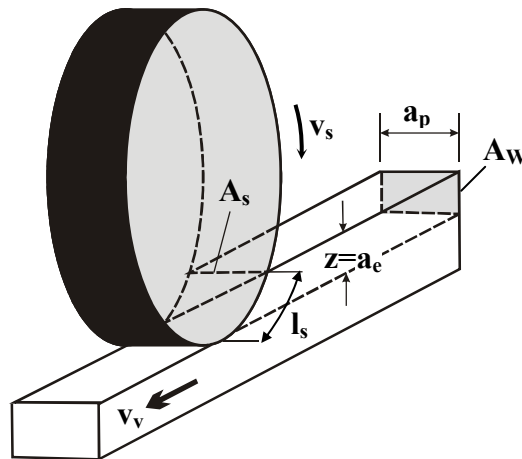


Abbildung 2.1: Wichtigste Kenngrößen des Schleifprozesses [TD04]

An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass der Arbeitseingriff (a_e) beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe immer kleiner als die tatsächliche Zustellung (x) ist, die im Bezug zum Nullpunkt der undeformierten Kontaktscheibe gemessen wird. Die Abtragshöhe an einer Stelle der Werkstückoberfläche ist bei der kraftabbildenden Prozessvariante (mit elastischem Werkzeug) eine Funktion des lokalen Andrucks und ergibt sich nicht direkt aus den geometrischen Verhältnissen, was der Fall ist, wenn ein starres Werkzeug eingesetzt wird.

In Abbildung 2.1 sind auch die geometrische Kontaktlänge (l_s) und Kontaktfläche (A_s), die durch die Werkstück- und Werkzeuggeometrie definiert sind, eingetragen, sowie die aus der Rotation des Werkzeuges resultierende Schnittgeschwindigkeit (v_s).

Basis der Modelle für die Schleifbearbeitung mit starrem Werkzeug ist unter anderem die Untersuchung der Vorgänge am Einzelkorn. Da die Schleifbreite (Schnitteingriff a_p) im Allgemeinen groß gegenüber den Vorgängen am Einzelkorn ist, wurde mit ausreichender Näherung angenommen, dass entlang des Schnitteingriffs gleiche Spanbildungsverhältnisse herrschen. Deshalb wurden die auf die Schleifbreite bezogenen Prozessgrößen definiert, wie z.B. das bezogene Spanvolumen (V'_w) oder Zeitspanvolumen (Q'_w) [TD04]:

$$V'_w = V_w / a_p \quad (mm^3 / mm), \quad Q'_w = Q_w / a_p \quad (mm^3 / mm \cdot s). \quad (2.4)$$

Die Einführung von bezogenen Prozessgrößen ist auch bei der Modellierung der Schleifbearbeitung frei geformter Oberflächen sinnvoll, weil sich in diesem Fall die Kontaktverhältnisse sehr schnell verändern. In den neuen Untersuchungen des Schleifens, die auch eine theoretische Basis für diese Arbeit sind, werden die Prozessgrößen sogar auf die finiten Elemente der Oberfläche bezogen.

2.3. Prozessvarianten beim Bandschleifen

In diesem Abschnitt werden verschiedene normierte und nicht normierte Varianten des Bandschleifens beschrieben.

2.3.1. Prozessvarianten nach DIN 8589-12

Nach DIN 8589-12 unterscheidet man beim Bandschleifen verschiedene Verfahrensvarianten. Die Ordnungsgesichtspunkte (OGP) für die Unterteilung und die normierten Varianten sind in Tabelle 2.1 gegeben.

In dieser Arbeit wird grundsätzlich das Form-Bandschleifen betrachtet. Diese Variante tritt bei der Bearbeitung von Freiformflächen auf und ist durch eine gesteuerte Vorschubbewegung gekennzeichnet. Die Industrieroboter mit mehreren Achsen sind wegen ihrer Flexibilität besonders für das Form-Bandschleifen geeignet und für die Automatisierung der anderen Prozessvarianten stehen meistens die steiferen und genaueren Automaten zur Verfügung.

Bei der Lage der Wirkfläche am umlaufenden Schleifband wird grundsätzlich zwischen dem Schleifen an der Kontaktscheibe (Umfangs-Bandschleifen, siehe Abb. 2.2a) und dem Schleifen an der Stützplatte (Seiten-Bandschleifen, siehe Abb. 2.2b) unterschieden. Als Übergangsvariante gilt hier das Schleifen am freien Band.

2. Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens

OGP	Varianten			
Zu erzeugende Fläche	Plan-Bandschleifen	Rund-Bandschleifen	Profil-Bandschleifen	Form-Bandschleifen
Lage der Bearbeitungsstelle am Werkstück	Außen-Bandschleifen	Innen-Bandschleifen		
Wirklfläche am Schleifwerkzeug	Umfangs-Bandschleifen	Seiten-Bandschleifen		
Richtung der Vorschubbewegung	Längs-Bandschleifen	Quer-Bandschleifen	Schräg-Bandschleifen	
Art der Steuerung (für Form-Bandschleifen)	Freiform-Bandschleifen	Nachform-Bandschleifen	Kinematisch Form-Bandschleifen	NC-Form-Bandschleifen

Tabelle 2.1: Prozessvarianten für Bandschleifen nach DIN 8589-12

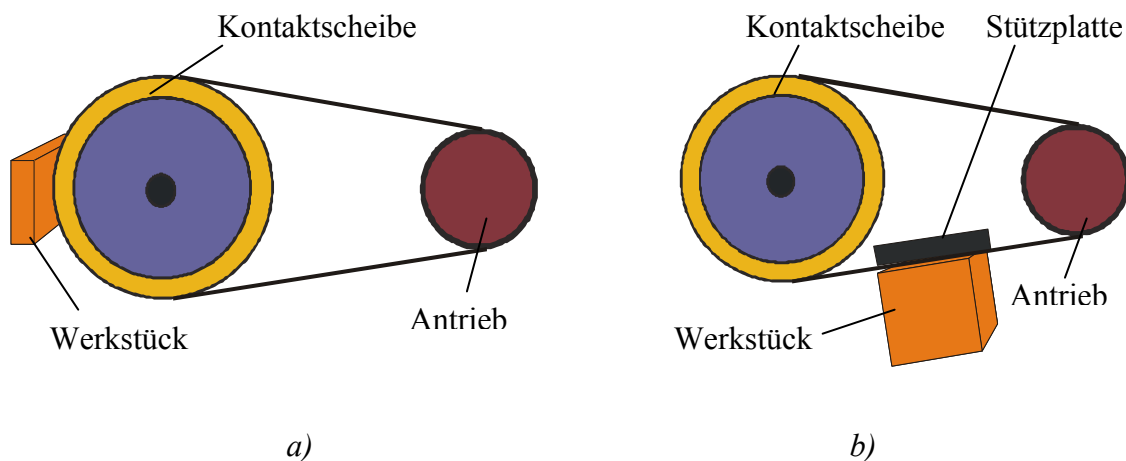


Abbildung 2.2: Umfanga- und Seiten-Bandschleifen [DIN 8589]

Die in dieser Arbeit betrachtete Prozessvariante mit der Kontaktscheibe ist am weitesten verbreitet, eignet sich für die Bearbeitung sowohl konvexer, als auch konkaver Flächen (Innen-/Außenflächen) und bietet die höchste Abtragsleistung. Die Vorschubbewegung beim Form-Bandschleifen kann frei von Hand (Freiform-Bandschleifen), über ein zweidimensionales Bezugsformstück (Nachform-Bandschleifen), kinematisch durch ein mechanisches Getriebe (Kinematisch Form-Bandschleifen) oder durch eingegebene Daten (NC-Form-Bandschleifen) gesteuert werden. Beim industrierobergestützten Bandschleifen handelt es sich ausschließlich um NC-Form-Bandschleifen, da in diesem Fall die Vorschubbewegung auf Basis von numerischen Daten gesteuert ist.

2.3.2. Nicht normierte Prozessvarianten

Neben den Ordnungsgesichtspunkten (OGP) nach DIN 8589-12 haben sich in der Praxis weitere Prozessvarianten des Bandschleifens herausgebildet. Die für diese Arbeit wichtigsten Varianten und die Kriterien für die Unterteilung sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Kriterium	Varianten	
Elastizität in der Kontaktzone	Kraftabbildend	Geometrieabbildend
Primäre Stellgröße	Kraftgeführt	Weggeführt
Aufbringen der Vorschubbewegung	Werkzeuggeführt	Werkstückgeführt

Tabelle 2.2: Prozessvarianten des Bandschleifens [Sch03, KK96]

Die Anwendung von flexiblen Kontaktscheiben verursacht eine Erhöhung der Elastizität im Kraftfluss zwischen Werkstück und Werkzeug. Die resultierende Andruckkraft reicht in diesem Fall nicht mehr aus, um das Werkstück freizuschneiden. Die Andruckverteilung zwischen elastischem Werkzeug und starrem Werkstück ist entscheidend für den resultierenden Abtrag. Hier wird von einer **kraftabbildenden** Prozessführung gesprochen. Im Gegensatz dazu ergibt sich bei der **geometrieabbildenden** Prozessvariante die resultierende Werkstückgeometrie ähnlich wie beim Fräsen durch Subtraktion des Werkzeug/Werkstück Schnittvolumens von der ursprünglichen Werkstückgeometrie. In Abbildung 2.3 sind die Abtragungsergebnisse bei geometrie- und kraftabbildender Prozessführung dargestellt.

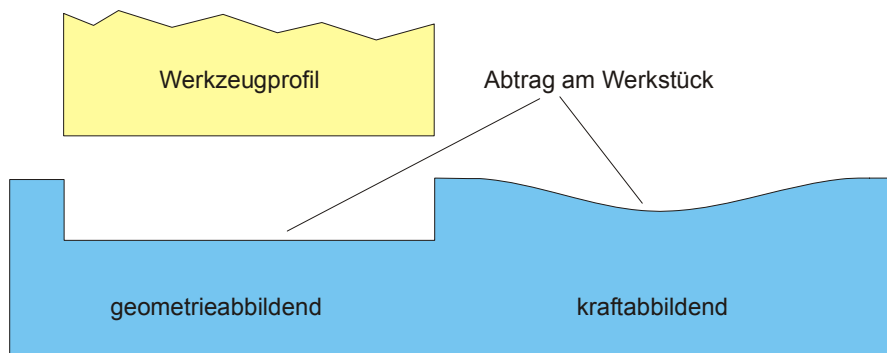


Abbildung 2.3: Abtragungsergebnis bei den Varianten mit Geometrie- und Kraftabbildung [Sch03]

Im Rahmen dieser Arbeit wird grundsätzlich die kraftabbildende Prozessführung betrachtet. Diese Prozessvariante ist besonders für die Bearbeitung von Freiformflächen geeignet, weil mit steigender Elastizität eine bessere Formanpassung an die Werkstückoberfläche erfolgt, die

eine facettenfreie Bearbeitung ermöglicht. Außerdem können Zustellungs- und Orientierungsfehler des Werkstücks durch die Elastizität in geringem Maße ausgeglichen werden. Ein Nachteil der Variante mit Kraftabbildung ist ein stark variierender Abtrag, der aufgrund sich schnell verändernder Kontaktverhältnisse bei der Bearbeitung einer mehrfach gekrümmten Geometrie ergibt [Sch03, Ham96]. Deshalb ist das Bandschleifen mit einer kraftabbildenden Prozessführung schwer zu modellieren.

Beim **weggeführten** Bandschleifen ist die Zustellung des Werkstücks an den Stützpunkten zusammen mit der Vorschubgeschwindigkeit die primäre Stellgröße des Prozesses. Dagegen ist die Vorgabekraft, mit der das Werkstück gegen das Schleifband gedrückt wird, die primäre Stellgröße bei der **kraftgeführten** Prozessvariante. Die Zustellung ist hier nicht genau definiert und ergibt sich dabei aus der Höhe der Andruckkraft und der Eigenschaften der Kontaktscheibe und des Schleifbandes. In der Praxis wird eine kraftgeführte Variante durch die Integration einer kraftgeregelten Linearachse (z. B. Luftdruckzylinder) an der Werkzeug- oder an der Werkstückseite erreicht. Beim industrierobotergetriebenen Bandschleifen kann die Kraftführung auch durch die Kraftregelung des Roboters erfolgen. Hier ist das Ziel, das Werkstück mit einer definierten Kraft, unabhängig von der Zustellbewegung, gegen das Werkzeug zu drücken [Sch03].

Bei der Variante mit Kraftführung sind theoretisch größere Abtragsraten möglich, da der maximale Abtrag nicht durch die Zustellung begrenzt ist, und die Andruckkraft während der Bearbeitung nicht abnimmt. Ein Ausgleich des Positionsfehlers in der Richtung der Vorgabekraft ist auch möglich. Als Nachteil wird genannt [KK96], dass mit dieser Variante nicht „auf Maß“ geschliffen werden kann, d.h. hohe Form- und Maßgenauigkeiten bei gleich bleibenden Zeitspannvolumina sind schwer realisierbar.

Ein großes Problem beim kraftgeführten Bandschleifen ist die Implementierung der Kraftregelung. Die pneumatischen Systeme mit Luftdruckzylindern zur Aufbringung der Kraft zwischen Werkzeug und Werkstück sind im Allgemeinen schwer zu regulieren, wenn eine höhere Regelungsgeschwindigkeit und Genauigkeit notwendig sind. Hinzu kommt, dass die Reibung im Luftdruckzylinder eine Implementierung der Kraftregelung zusätzlich erschwert. Da die Reibung immer der Bewegungsrichtung (Hystereseeffekt) entgegenwirkt, werden verschiedene Kräfte bei konstantem Luftdruck für zwei verschiedene Bewegungsrichtungen des Zylinders erzeugt [Sch03]. Dadurch wird die Qualität der Kraftregelung wesentlich vermindert. Die Alternative für die Kraftregelung durch pneumatische Systeme ist eine aktive Kraftregelung des Roboters. Die Regelung der Kraft am Effektor des Roboters ist in den letzten zwei Jahrzehnten ein großes Forschungsgebiet geworden, das in der jüngsten Vergangenheit durch die

Weiterentwicklung der Sensoriksysteme zur Kraftmessung und der Regelungsalgorithmen begünstigt ist. Durch die Verwendung von adaptiven Reglern für die Kraftregelung sind die modernen Industrieroboter immer mehr in der Lage, die komplexen Bewegungsbahnen auszuführen, wobei die gewünschte Kraft zwischen Werkzeug und Werkstück erzeugt wird.

Zur Aufbringung der relativen Vorschubbewegung beim Bandschleifen kann entweder das Werkzeug oder das Werkstück geführt werden (Abbildung 2.4). In der Praxis wird die **werkstückgeführte** Prozessvariante meistens wegen des robusteren Aufbaus des Werkzeugs und dadurch kleineren Einflüssen der dynamischen Kräfte vorgezogen. Bei dieser Variante ist auch der Einsatz von längeren Schleifbändern möglich, wodurch auch die Standzeiten verlängert werden.



a)



b)

Abbildung 2.4: a) Werkzeug- und b) werkstückgeführtes Bandschleifen [Car]

Die **werkzeuggeführte** Prozessvariante wird vor allem verwendet, um Werkstücke zu bearbeiten, deren Gewicht das maximale Handhabungsgewicht des Roboters übersteigt. Mit der Verwendung von Werkzeugwechselsystemen ist die Anzahl der einsetzbaren Werkzeuge für die Bearbeitung eines Werkstücks bei dieser Prozessvariante nicht begrenzt.

2.4. Schleifbandaufbau

Schleifbänder bestehen aus Schleifmittel, das mit Hilfe von Bindemittel auf der Unterlage fest eingebettet ist. Die Bindemittel werden in Grund- und Deckbindemittel unterteilt (siehe Abbildung 2.5). Als Bindemittel werden hauptsächlich härtbare Kunstharze, vornehmlich Phenolharze, genutzt. Um die Standzeit des Schleifbandes zu erhöhen, können schleifaktive Wirkstoffe entweder auf das Deckbindemittel aufgebracht oder in Grund- und Deckbindemittel eingebettet werden. Diese vermindern bzw. vermeiden unerwünschte chemische und phy-

2. Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens

sikalische Reaktionen (Wärme und Verschleiß) während des Schleifprozesses [VDI3396]. Das Konstruktionsprinzip eines Schleifbandes ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

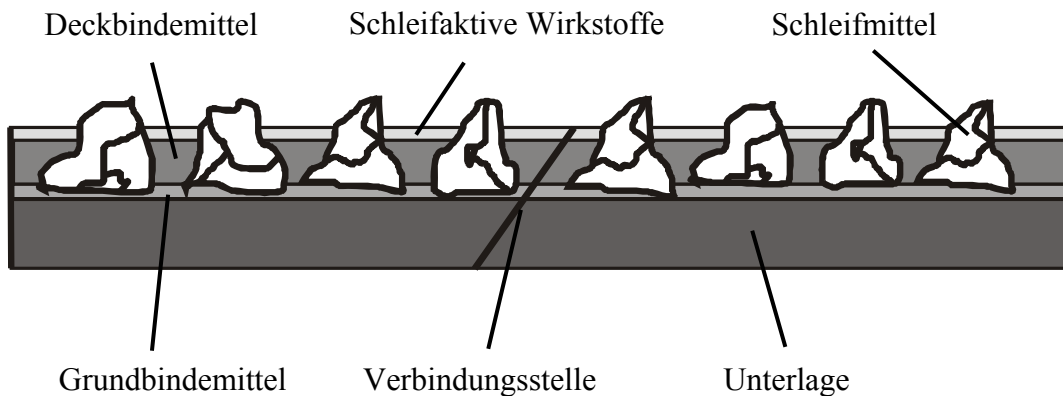


Abbildung 2.5: Konstruktionsprinzip Schleifband [VDI3396]

Die Unterlage trägt das Schleifmittel. Die Eigenschaften des Schleifbandes wie Flexibilität, Nachgiebigkeit, Härte oder Steifigkeit hängen zum größten Teil von den Eigenschaften der Unterlage ab. Es werden verschiedene Werkstoffe, z. B. spezielle Papiere, Baumwoll-, Kunstfaser- oder Mischgewebe sowie Polyester-Nähgewirke mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften als Unterlage eingesetzt. Unterlagen aus Baumwoll- oder Polyestergewebe bzw. -gewirke werden meistens als Unterlage für Schleifbänder in der Metallbearbeitung angewendet. Durch eine zusätzliche technische Bearbeitung erhält die Unterlage die gewünschten Eigenschaften wie z. B. Dichtigkeit, mechanische Festigkeit, Flexibilität usw. [Ost00]. Die Bindemittel werden im flüssigen Zustand aufgebracht und bilden nach der Trocknung bzw. Härtung zusammen mit dem Schleifkorn eine harte und feste Schicht. In einem speziellen Fertigungsvorgang, dem sog. „Flexen“, wird diese Schicht gezielt gebrochen, um die erforderliche Flexibilität des Schleifmittels zu erhalten. Es gibt keine genormte Klassenunterteilung für die Unterlagen. Meistens werden flexiblere und leichtere Unterlagen mit J und schwerere und steifere mit Y oder Z bezeichnet. Viele Schleifwerkzeughersteller haben modifizierte Bezeichnungen für Flexibilitäts- oder Gewichtsabstufungen.

Um endlose Schleifbänder zu erhalten, werden die Enden eines definierten Zuschnitts von Schleifmittel auf Unterlage über eine Verbindungsstelle (Bandstoß oder Bandverschluss) geschlossen. Zahlreiche Konstruktionen der Verbindungsstellen, die als Überlapp- oder Stoßverbindungen ausgeführt sind, sind für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche entwickelt worden.

2.5. Schleifmittel

Laut VDI 3396 werden als Schleifmittel überwiegend Normal- und Halbedelkorund (AO) sowie Zirkonkorund (ZK) und Siliziumkarbid (SiC) angewendet. Eine neuere Schleifkornentwicklung ist der mikrokristalline Sinterkorund (SK), der auch als „Sol-Gel-Korund“, „mikrokristallines Aluminiumoxid“ oder „Keramikkorn“ bezeichnet wird. Dank der spezifischen mikrokristallinen Struktur des Schleifmittels zeichnen sich solche Schleifbänder durch geringe Verschleißempfindlichkeit und hohe Standzeiten aus [Ost00].

Eine neuere Entwicklung im Bereich der verschleißfesten Schleifbänder stellen Trizact-Schleifmittel von Fa. 3M dar. Die gleichmäßige Pyramidenstruktur des Schleifmittels besteht aus mehreren übereinander liegenden Schleifkornlagen, wodurch beim Schleifen ständig neue, scharfe Schleifkörner freigesetzt werden. Diese Struktur ermöglicht eine konstante Abtragsleistung einhergehend mit einer erhöhten Standzeit des Schleifbandes [3M].

Die wichtigsten Kenngrößen eines Schleifmittels sind die Härte bzw. Schneidfähigkeit und die Zähigkeit. Abhängig davon finden verschiedene Schleifmittel ihre spezifischen Anwendungen. Z. B. weisen Zirkonrund und Sinterkorund im Vergleich mit herkömmlichen Korunden eine geringere Härte sowie eine sehr hohe Zähigkeit auf. Aufgrund ihres kristallinen, gleichmäßigen Gefüges sind sie durch auftretende Selbstschärfefeffekte für hohe Zeitspannungsvolumina bei der Fertigung von legierten Stählen besonders geeignet. Im Gegensatz dazu ist Siliziumkarbid ein Schleifmittel mit der höchsten Scharfkantigkeit und Härte bzw. Schneidfähigkeit, aber gleichzeitig mit der größten Sprödigkeit und Bruchempfindlichkeit. Als solches wird Siliziumkarbid meistens als Schleifmittel beim Schleifen von Nichteisenmetallen (außer Aluminium) wie z. B. Glas, Keramik, Stein, Kunststoff, amorphen Werkstoffen usw. angewendet. Eine größere Bedeutung ist für kubisch kristallines Bornitrid (CBN) und Diamant beim Bandschleifen in der Zukunft trotz des hohen Preises zu erwarten. Ihre grundsätzliche Eignung für das Bandschleifen als härteste Schleifmittel wurde bereits in einigen Fällen nachgewiesen [VDI3396].

Weitere wichtige Kenngrößen des Schleifbandes, neben der Kornart, sind die eingesetzten Korngrößen sowie die Korndichte, d. h. der Schneidenabstand. Nach DIN ISO 6344 werden die Körnungen klassifiziert. Die Körnungen der Schleifbänder mit Schleifmitteln auf Unterlage werden mit dem Buchstaben „P“ gekennzeichnet (z. B. Körnung P 60). Die kleinste Körnungsnummer nach diesem Standard wird mit P 12 gekennzeichnet (mittlerer Korndurchmesser etwa 1,8 mm), und der größten Körnungsnummer entspricht die Kennzeichnung P 2500 (mittlerer Korndurchmesser etwa 8,4 µm). Kleine Körnungsnummern stehen für große Korndurchmesser und große Körnungsnummern für kleine Korndurchmesser. Die Körnungen wer-

den in fünf Bereiche unterteilt: sehr grob (bis P 24), grob (P 30-P 50), mittel (P 60-P 120), fein (P 150-P 400) und sehr fein (über P 500). In Sonderfällen können auch Körnungen mit einem Korndurchmesser bis unter 1 μm verwendet werden.

2.6. *Elastische Kontaktscheibe*

Die Kontaktscheiben dienen als Stützelemente für das Schleifband beim Bandschleifen. Eine elastische Kontaktscheibe besteht üblicherweise aus dem Aluminium-Kern, auf dem ein etwa 10-40 mm hoher, elastischer Laufpolsterring aus Gummi oder Kunststoff angebracht ist. Zusammen mit dem Schleifband ist die Kontaktscheibe der wichtigste Bestandteil eines Bandschleifsystems.

Neben dem Durchmesser sind die Härte, Art und Gestaltung des Laufpolsters die wichtigsten Merkmale einer Kontaktscheibe. Um die größte Wirtschaftlichkeit und die höchstmögliche Abtragsleistung zu erzielen, ist es von entscheidender Bedeutung, eine richtige Kontaktscheibe-Schleifband-Kombination für ein Bandschleifverfahren zu wählen. Die Kontaktscheibe und das Schleifband müssen flexibel genug sein, um sich an die Werkstückform anzupassen, und um das gewünschte Schliffbild zu erbringen. Je komplexer die Werkstückoberfläche (mehrfache Krümmung), desto flexibler muss das ausgewählte Werkzeug sein. Andererseits verringern Kontaktscheibe-Schleifband-Systeme mit einem zu weichen Laufpolster die Abtragsleistung und damit die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Um eine vibrationsfreie Bearbeitung zu ermöglichen, muss das Schleifband 1-2 mm breiter sein als die Kontaktscheibe. Eine falsche Wahl des Kontaktscheibe-Schleifband-Systems kann die Kosten der Bearbeitung verdoppeln oder sogar verdreifachen [Ruc].

2.6.1. Härte des Laufpolsters

Die Härte einer Kontaktscheibe beeinflusst in einem hohen Maße die Abtragsleistung beim Schleifen. Die Härte des Laufpolsters wird in SHORE (°) gemessen. Je härter das Laufpolster ist, desto größer ist der SHORE - Wert. Die Härte des Kontaktscheibe-Laufpolsters soll anhand der Form des zu bearbeitenden Werkstücks, des verwendeten Schleifbands, der gewünschten Oberflächenqualität und der benutzten Schleifmaschine ausgewählt werden.

Je größer die Härte ist, umso höher ist die Haltbarkeit und Formbeständigkeit des Laufpolsters. Deshalb werden bei der Bearbeitung der Werkstücke mit geraden Schleifflächen die Kontaktscheiben mit härterem Belag eingesetzt. Im umgekehrten Fall, wenn stark gekrümmte Oberflächen bearbeitet werden, wird ein weicher Belag genutzt. Bei härteren und unflexiblen Schleifband-Unterlagen (Y, Z-Gewebe) werden üblicherweise die Kontaktscheiben mit hartem bis mittelhartem Laufpolster benutzt. Je weicher und flexibler das Schleifband ist (z.B. J-

Gewebe), desto weicher sollte auch das Laufpolster der Kontaktscheibe sein. Neben der Körnung des Schleifbandes ist die Härte der Kontaktscheibe ein wichtiger Faktor für die Oberflächenqualität des Werkstücks nach der Bearbeitung. Es wurde festgestellt, dass sich bei gleicher Körnung ein feineres Schliffbild ergibt, wenn eine Kontaktscheibe mit weicherem Laufpolster verwendet wird [Kem, Pic].

Ein weiterer Faktor bei der Auswahl der richtigen Kontaktscheibe ist die Schleifmaschine, wobei eine etwas weichere Kontaktscheibe die Unruhe der Maschine mit weniger stabilen Schleifeinheiten kompensieren muss. Dagegen darf bei einer Schleifmaschine mit solidem starrem Maschinenkörper eher eine härtere Kontaktscheibe eingesetzt werden. Bei mehreren Schleifstationen, die hintereinander geschaltet sind, ist es manchmal empfehlenswert diese mit unterschiedlichen Härten zu versehen, d. h. dass man für den Vorschliff auf den ersten Stationen härtere und für den Feinschliff weichere Kontaktscheiben einsetzt [Ruc].

2.6.2. Material des Laufpolsters

Die am meisten verwendeten Materialien für das Laufpolster sind [Pic]:

- Gummi, mittlere und höhere Härte (etwa 40°-90°),
- Kunststoff „Vulkollan“, mittlere und höhere Härte (etwa 50°-100°),
- Kunststoffschaum, weich (etwa 5°-50°),
- Kombinationen der o. g. Materialien.

Gummi-Scheiben werden üblicherweise für die Bearbeitung von Eisenmetallen (z.B. Stahlrohre, Heizkörper usw.) empfohlen, während Vulkollan-Scheiben für die „weicheren“ Metalle benutzt werden (z. B. Messing bei Sanitärarmaturen). Das Laufpolster aus Vulkollan hat den Vorteil, dass die Schleifbänder auf der Kontaktscheibe gut geführt werden.

2.6.3. Gestaltung des Laufpolsters

Die Gestaltung des Laufpolsters beeinflusst in einem hohen Maße die Abtragsleistung und die Werkstückformanpassung beim Bandschleifen. Für die Feinbearbeitung eignen sich z. B. am besten weichere Kontaktscheiben mit glatter Ausführung (Abbildung 2.6a), weil sie die größtmögliche Kontaktzone zwischen dem Band und dem Werkstück erlauben und den niedrigsten Einheitsdruck auf jeden Schleifkorn bewirken [Ruc, Pic]. Demgegenüber ermöglichen die Kontaktscheiben mit gefrästem Laufpolster (Abbildung 2.6b), dank der Wirkung ihres Nut-Steg-Verhältnisses eine Erhöhung des Andrucks auf das zu bearbeitende Werkstück und damit eine größere Abtragsleistung durch das Reduzieren der Kontaktfläche und durch die erzeugte Stoßwirkung.

2. Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens

Bei geraden Schleifflächen setzt man Kontaktscheiben mit gröberer Nutung ein und bei der Bearbeitung von gekrümmten Werkstücken werden Kontaktscheiben mit feinerer Nutung verwendet.

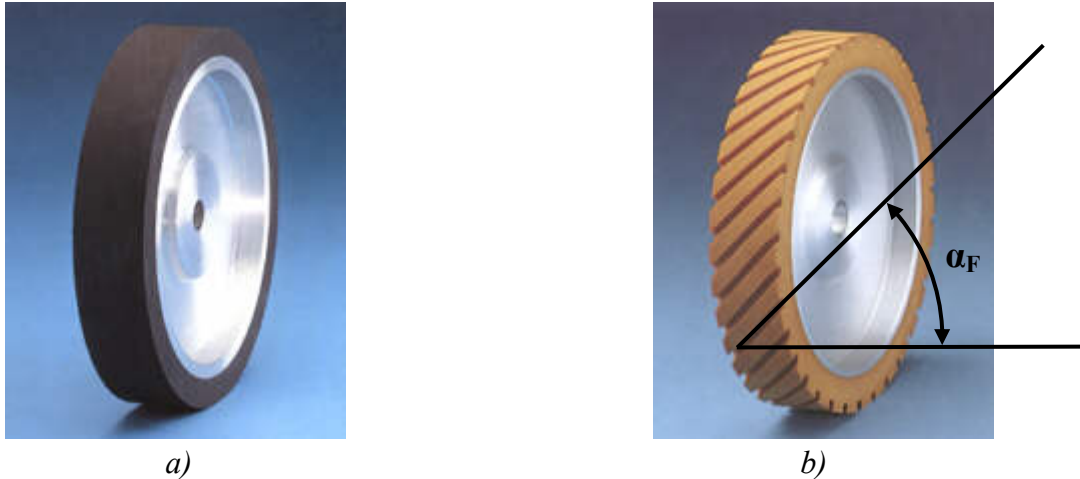


Abbildung 2.6: Verschiedene Gestaltungen des Laufpolsters [Pic]

Nutungen oder Fräsungen können in alle Belagarten mit verschiedenen Breiten angebracht werden. Je größer diese Abstände zwischen den Stegen sind, desto größer ist die Abtragsleistung. Andererseits verursachen die Kontaktscheiben mit gröberer Nutung eine größere Geräuschentwicklung. Das Nut-Steg-Verhältnis ist in Verbindung mit dem Fräsungswinkel (α_F , siehe Abb. 2.6b), der im Normalfall zwischen 25° und 60° gemessen zur Achse liegt, von großer Bedeutung bei der Suche nach der wirtschaftlichsten und geräuschärmsten Kontaktscheibe, die im Zusammenspiel mit dem Schleifband ein optimales Schliffbild liefert. Aus der Praxis ist es bekannt, dass sich bei Kontaktscheiben mit Fräsungswinkeln von etwa 45° bis 60° wesentlich weniger Lärm als bei Kontaktscheiben mit kleineren Fräsungswinkeln (0° bis 25°) entwickelt. Auf der anderen Seite ist bei den kleineren Fräsungswinkeln das erzielte Spanvolumen etwas größer. Deshalb muss in den meisten Fällen ein Kompromiss zwischen Schleifleistung und Lärmbelästigung gefunden werden. Als vertretbarer Mittelwert hat sich in den letzten Jahren die 45° -Fräsung ergeben [Pic].

Neben dem Ringbelag für die Kontaktscheiben werden auch die verschiedenen Lamellenbeläge entwickelt. Der Lamellenaufbau eines Kontaktscheibenbelages erlaubt viele Gestaltungsmöglichkeiten, um für bestimmte Einsatzbereiche die bestmögliche Kontaktscheibe herzustellen. Ein Vorteil der Lamellenausführung gegenüber dem gefrästen Laufpolster liegt z. B. darin, dass die Lamellen etwas flexibler sind und somit eine durch die gefräste Ausführung ent-

standene Rattermarkenbildung beseitigen. Dadurch wird auch eine bessere Bandausnutzung erreicht [Ruc].

2.6.4. Umfangsgeschwindigkeit der Kontaktscheibe

Die Geschwindigkeit und Größe der Kontaktscheibe bestimmen die Geschwindigkeit des Schleifbandes und damit die Abtragsleistung. Die Umfangsgeschwindigkeit der Kontaktscheibe ist bei der Bearbeitung durch die Motorleistung der Bandschleifmaschine begrenzt, wobei die Sicherheit des Betriebs gewährleistet werden muss. Die Bandgeschwindigkeit hängt in großem Maße vom zu bearbeitenden Werkstoff ab. Die empfohlenen Werte der Bearbeitungsgeschwindigkeit für verschiedene Werkstoffe sind in der Tabelle 2.2 dargestellt.

Edelstahl	30-45 m / sec.
Legierter Stahl	30-45 m / sec.
Aluminium/Magnesium-Legierung	30-50 m / sec.
Bronze, Messing	30-50 m / sec.
Titan	10-15 m / sec.
Glas	15-20 m / sec.
Holz	15-20 m / sec.
Marmor, Granit	30-40 m / sec.
Kunststoff	10-20 m / sec.

Tabelle 2.2: Empfohlene Werte für die Bearbeitungsgeschwindigkeit [Ruc, Bur91, Fri01]

Bei der Wahl der Umfangsgeschwindigkeit ist auch die Lärmentwicklung von Bedeutung, weil bei der Bearbeitung mit den größeren Geschwindigkeiten unangenehme Geräusche entstehen können.

2.7. Prozessmodelle für das Schleifen in der Forschung

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ansätze bei der Modellierung von Schleifprozessen erläutert.

2.7.1. Experimentelle Untersuchungen des Schleifens mit elastischem Werkzeug

Viele Autoren beschäftigten sich mit experimentellen Untersuchungen des Bandschleifens mit elastischem Werkzeug. Tönshoff und Hinzmann [TH83] untersuchten die Einflüsse wichtiger Prozessparameter auf das Spanvolumen und auf die Rauheit der Werkstückoberfläche beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe. Es wurden zylindrische Rohrwerkstücke mit konstanter Normalkraft an die Kontaktscheibe mit dem Schleifband gedrückt und der Verlauf

der Ergebnisgrößen während des Einsatzes eines Bandes für gewünschte Kombinationen der Einflussgrößen aufgenommen. Hierbei wurde immer ein Einflussfaktor (Laufpolsterprofilierung, Laufpolsterhärte, Durchmesser der Kontaktscheibe, Normalkraft, Schnittgeschwindigkeit) variiert und die anderen Faktoren wurden konstant gehalten, was als Ein-Faktor-Zur-Zeit Methode bezeichnet wird. Eine lineare Abhängigkeit des Zeitspanvolumens von der Normalkraft sowie ein wesentlicher Einfluss der Laufpolsterhärte und des Kontaktscheibendurchmessers wurden festgestellt. Diese Abhängigkeiten wurden mit der Veränderung der Kontaktfläche erklärt, wobei die Geometrie des Werkstücks vernachlässigt wurde. Es wurde von einer konstanten Andruckverteilung ausgegangen, d. h. der Bandschleifprozess wurde global betrachtet.

Um Technologiedaten für das Bandschleifen zu ermitteln, untersuchte Grube [Gru91] die Abhängigkeit der bezogenen Schnittkraft und des bezogenen Zeitspanvolumens von Maschinenstellgrößen (Zustellung, Vorschub) bei Werkzeugvariation (Laufpolsterhärte, Körnung des Schleifbandes). Diese Untersuchungen wurden um die Ermittlung der effektiven Kontaktfläche bei der Schleifbearbeitung erweitert, wobei 3 Schritte verwendet wurden:

1. mit Hilfe eines Kraft-/Momentensensors wurde die Normalkraft für eine Kontaktsituation zwischen der elastischen Kontaktscheibe und des Werkstücks mit definierter (zylindrischer, flächiger) Geometrie gemessen,
2. aus den experimentell ermittelten Abhängigkeiten zwischen der Normalkraft und der Zustellung für eine Werkstück-Werkzeug Kombination wurde die aktuelle Zustellung ermittelt,
3. die tatsächliche Kontaktfläche wurde dann anhand der theoretischen Geometrieverhältnisse für die ermittelte Zustellung und eine bekannte Werkstückgeometrie berechnet.

Ein ähnlicher Ansatz wird teilweise im Rahmen dieser Arbeit bei der Kalibrierung des FEM-Andruckverteilungsmodells verfolgt, wobei die experimentellen Abhängigkeiten zwischen Normalkraft und Zustellung für zweifach gekrümmte Werkstücke bestimmt werden.

Gehring [Geh93] beschäftigte sich in seiner Arbeit auch mit der experimentellen Ermittlung der Kontaktfläche. Die elastische Kontaktscheibe mit dem im Vergleich zu den Werkstückmaßen wesentlich kleineren Durchmesser wurde an zweifach gekrümmte (kugelförmige) Werkstücke gedrückt. Mit Hilfe von Tuschiefarbe wurde die Kontaktfläche abgebildet. Es wurden auch die Zustellung-Kraft-Diagramme (sog. Federkennlinien) für verschiedene Laufpolsterhärten der Kontaktscheibe und verschiedene Krümmungen eines Werkstücks ermittelt. Anhand dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass es **nicht** möglich ist, mehrfach gekrümmte Oberflächen im Hinblick auf Maß- und Formgenauigkeiten mit einer reinen Positi-

onsführung des Prozesses fein zu bearbeiten. Als Alternative bietet sich die kraftgeführte Prozessvariante an, wobei die Anpresskraft gezielt an die momentanen Kontaktbedingungen angepasst werden muss.

2.7.2. Inverses Modell für das Bandschleifen von Meyerhoff

Meyerhoff [Mey98] entwickelte ein NC-Programmiersystem für die Bandschleifbearbeitung von mehrfach gekrümmten Oberflächen. Die Bearbeitung erfolgte auf einer 5-Achsen Fräsmaschine mit montierter Bandschleifvorrichtung. Um eine maß- und formgenaue Werkstückoberfläche zu erzeugen, d. h. eine regelmäßige Abtragsverteilung auf der ganzen Werkstückoberfläche zu erhalten, wurde die Vorschubgeschwindigkeit als primäre Stellgröße für das System ausgewählt. Anhand der Gleichung (2.2) ergibt sich die Vorschubgeschwindigkeit (v_v) in Abhängigkeit von Zeitspanvolumen (Q_w) und Eingriffsquerschnitt (A_w) als [Mey98]:

$$v_v = Q_w / A_w \quad (mm/s) \quad (2.5)$$

Während die Kontaktfläche theoretisch anhand des Fräsrillenprofils, der Quer- und Längskrümmung des Werkstücks ermittelt wurde, ließ sich das Zeitspanvolumen durch experimentelle Untersuchungen der Einflüsse von Schleifbandkörnung, -verschleiß, Normalkraft, Schnittgeschwindigkeit und Voreilwinkel berechnen. Dabei wurden ein signifikanter Einfluss der Schleifbandkörnung auf das Zeitspanvolumen sowie ein linearer Zusammenhang zwischen dem Zeitspanvolumen und der Normalkraft festgestellt. Ähnlich wie Gehring benutzte Meyerhoff bei seinen Untersuchungen Kontaktscheiben mit kleinen Durchmessern in einer werkzeuggeführten Prozessvariante.

Bei der Bearbeitung eines Werkstücks mit kleineren Krümmungsradien stößt der Roboter sehr oft an die Grenzen der Achsgeschwindigkeiten, weil der Effektor sehr schnell umorientiert werden muss. Bei einer Prozessführung mit der Vorschubgeschwindigkeit als Stellgröße ist dieser Effekt noch deutlicher, weil in diesem Fall die Geschwindigkeit an den kritischen Stellen entsprechend erhöht werden muss, was ein Nachteil dieser Variante ist.

2.7.3. Finite-Elemente Modell für das Stirnschleifen von Hammann

Hammann [Ham98] untersuchte das Abtragsverhalten der elastischen Werkzeuge am Beispiel des Stirnschleifens. Er stellte fest, dass bei der Bearbeitung von Freiformflächen eine lokale Analyse des Prozesses durch die Modellierung des elastischen Verformungsverhaltens und des Abtragsvorgangs an einem finiten Schleifelement notwendig ist, um den Prozess mit einer ausreichenden Genauigkeit für die Anwendung eines Automatisierungssystems beschreiben zu können.

Das Verformungsverhalten eines elastischen Werkzeugs in der Form eines elastischen Schleiftellers für das Stirnschleifen wurde im ersten Schritt mit Hilfe von FEM modelliert, wobei auch die dynamischen Kräfte bei der Rotation des Werkzeugs mit einbezogen wurden. Die notwendige Modellierung und Diskretisierung des Werkzeugs und des Werkstücks, sowie die Berechnungen von Verformungen und Spannungen in der Kontaktzone, wurden mit Hilfe von kommerziellen CAD- und FEM-Systemen durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wurde der Einfluss der Prozessparameter auf den quantitativen Materialabtrag untersucht. Auf Basis eines kleinen Werkstücks, das als ein finites Schleifelement betrachtet wurde und einen Querschnitt von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ aufwies, wurde die Zerspanleistung bei der Bearbeitung mit elastischem Schleifteller experimentell ermittelt. Dabei konnten ein linearer Einfluss der globalen Anpresskraft (F_G) und der Schnittgeschwindigkeit sowie ein reziproker Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf das Zeitspanvolumen festgestellt werden [Ham98]:

$$Q_w \approx F_G \cdot v_s \quad \text{und} \quad Q_w \approx \frac{1}{v_v}. \quad (2.6)$$

Das erzielte Zeitspanvolumen an einem finiten Schleifelement wurde definiert als [Ham98]:

$$Q_w = \frac{V_w}{t_e} = \frac{a_i \cdot l_e^2}{t_e}, \quad (2.7)$$

wobei a_i (mm) die erzielte Abtragstiefe, l_e (mm) die Länge und Breite des finiten Elements und t_e (s) die Wirkzeit des Werkzeugs auf das finite Element ist. Es wurde wegen der kleinen Dimensionen des Werkstücks angenommen, dass die lokale Kontaktkraft F_k gleich der globalen Anpresskraft F_G ist. Die Wirkzeit t_e bei einer Vorschubbewegung ist als Quotient zwischen der Kontaktlänge l_e und der Vorschubgeschwindigkeit v_v definiert:

$$t_e = l_e / v_v. \quad (2.8)$$

Durch die Substitution von Q_w aus Gleichung (2.6) und t_e aus Gleichung (2.8) in die Gleichung (2.7) und durch die Einführung einer werkstoffspezifischen Abtragskonstante K_A und eines Standzeitfaktors k_t , der den Verschleißzustand des Werkzeugs beschreibt, erhielt Hamann die Gleichung für die von einem diskreten Schleifelement erzielte Abtragstiefe in der Form [Ham98]:

$$a_i = K_A \cdot k_t \cdot \frac{v_s}{v_v} \cdot \frac{F_k}{l_e} \quad (2.9)$$

Da die experimentellen Zusammenhänge aus der Gleichung (2.6) durch die Ein-Faktor-Zur-Zeit Methode ermittelt wurden, wobei wichtige Zusammenspiele mehrerer Faktoren (z. B. Normalkraft und Kontaktfläche) nicht berücksichtigt wurden, eignet sich das Modell nicht für

eine genaue Berechnung der Abtragstiefe beim Bandschleifen. Es bietet sich aber als eine theoretische Grundlage für experimentelle Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe an, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wird.

2.7.4. Finite-Elementen Modell für das Bandschleifen von Schüppstuhl

Schüppstuhl [Sch03] verfolgte in seiner Arbeit den Ansatz von Hammann bei der Modellierung des Bandschleifprozesses mit elastischem Werkzeug, wobei u. A. ein Ansatz für ein prozessorientiertes Offline-Programmierverfahren und ein rechnergestütztes Prozesssimulationsverfahren für das weggeführte Bandschleifen entwickelt wurden. Es wurden zunächst die Geometrieparameter (die Stützpunkte der Bewegungsbahn, deren Orientierung, Verknüpfung und Verteilung) ermittelt, sodass die zu bearbeitende Werkstückoberfläche in geeigneter Form überdeckt wurde. Durch ein Prozessmodell wurden die Prozessparameter so ausgewählt und berechnet, dass ein Prozessergebnis gemäß der Vorgaben im Bezug auf die Oberflächenqualität und den zu erzielenden Abtrag erreicht werden sollte.

Um den Einfluss der variierenden Andruckverteilung bei der Bearbeitung von Freiformflächen zu beschreiben, wurde ähnlich wie bei Hammann zunächst ein FEM-Modell für die Berechnung der Größen der lokalen Andruckkräfte für eine Kontaktsituation entwickelt. Danach wurde der lokale Abtrag an einem einzelnen Schleifelement unter Einwirkung einer lokalen Kraft durch die Abtragsgleichung ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass die Abtragshöhe an einem diskreten Schleifelement eine Funktion der lokalen Andruckkraft F_k , der Schnittgeschwindigkeit v_s und der Einwirkzeit t_e ist. Schüppstuhl übernahm von Tönshoff und Hinzmann [TH83] einen empirisch ermittelten proportionalen Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und der Einwirkzeit auf den Abtrag:

$$a_i \approx v_s \cdot t_e \quad (2.10)$$

Im Gegensatz dazu wurde experimentell ein überproportionaler Einfluss des Andrucks auf die Abtragungsgeschwindigkeit festgestellt, wobei die Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug konstant gehalten wurde. Dieser Einfluss wurde durch ein Ausgleichspolynom zweiten Grades beschrieben, was in Kombination mit der Gleichung (2.10) ergab [Sch03]:

$$\dot{a}_i = K_q \cdot F_k^2 \cdot v_s + K_l \cdot F_k \cdot v_s \quad (2.11)$$

Durch die Faktoren K_q und K_l wurde der Einfluss der Schleifbandkörnung und des Werkstückmaterials beschrieben. Durch die Integration der Gleichung (2.11) und die Einführung des Bandverschleißfaktors k_t erhält man die Abtragsgleichung für ein diskretes Schleifelement in der Form [Sch03]:

$$a_i = k_t \cdot K_q \cdot F_k^2 \cdot v_s \cdot t_e + k_l \cdot K_l \cdot F_k \cdot v_s \cdot t_e \quad (2.12)$$

Als Ausgangspunkt für sein Modell übernahm Schüppstuhl die Zusammenhänge, die aus den „Ein-Faktor-Zur-Zeit“ Versuchen stammten.

2.8. Globale und lokale Analyse der Bandschleifprozesse

In ersten experimentellen Untersuchungen des Bandschleifprozesses, [u. a. KK96, Mey98, TH83], wurden globale Prozesszusammenhänge betrachtet, d. h. die Form der zu bearbeitenden Oberfläche wurde vernachlässigt. Im Gegensatz dazu wird bei der Modellierung der lokalen Zusammenhänge [Ham98, Sch03] die Form der Oberfläche berücksichtigt, was besonders bei der Bearbeitung von Freiformflächen wichtig ist.

2.8.1. Globale Prozessmodellierung des Bandschleifens mit elastischer Kontaktscheibe

In der Abbildung 2.7 werden als Ergebnis erster globalen Untersuchungen [TH83, KK96] die qualitativen Beziehungen zwischen den Stellgrößen Andruckkraft, Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit und dem resultierenden Spanvolumen dargestellt.

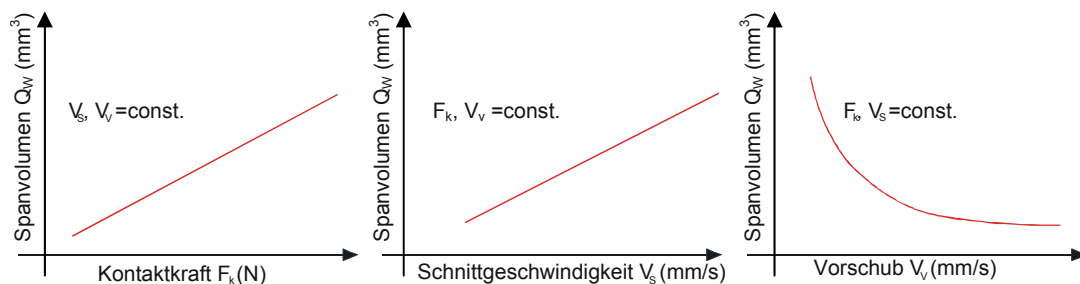


Abbildung 2.7: Einfluss der Stellgrößen auf das Spanvolumen [KK96]

Hier wurde ein proportionaler Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf das Spanvolumen festgestellt, weil sich bei höheren Schnittgeschwindigkeiten mehr Körner des Schleifbandes im gleichen Zeitabschnitt im Eingriff befinden. Im Gegensatz dazu hat die Vorschubgeschwindigkeit einen umgekehrt proportionalen Einfluss, weil bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten die Schleifzeit für jeden einzelnen Teil der gesamten Oberfläche kürzer wird.

Bandschleifen mit elastischer Kontaktrolle ist ein kraftabbildender Prozess. Dabei ist die Andruckkraft die wichtigste Stellgröße des Prozesses. Die Anpassung des Abtrags an die variierenden Eingangsgrößen (z. B. variierende Werkstückgeometrie) während der Bearbeitung erfolgt in der Regel entweder direkt durch eine Andruckkraftregelung oder indirekt durch eine Regelung der Zustellung. Den ersten globalen Untersuchungen zufolge ist der Zusammenhang zwischen globaler Andruckkraft und globalem Abtrag näherungsweise linear.

Außer den Stellgrößen wurden in den experimentellen Untersuchungen auch andere Einflussgrößen betrachtet. König [KK96] hat z. B. den Einfluss der Werkzeugparameter (Radius, Elastizität, Profilierung) auf das Zeitspanvolumen beschrieben (siehe Abbildung 2.8).

Hier wurden die Verschleißkurven der Schleifbänder aufgenommen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass am Anfang bei der Verwendung von Kontaktscheiben mit einem kleineren Durchmesser, härteren Laufpolster und größeren Nut-Steg Verhältnis ein größeres Zeitspanvolumen erzielt werden kann. Dagegen hat die Verschleißkurve bei solchen Kontaktscheiben einen steileren Verlauf, das Zeitspanvolumen nimmt schneller zu und das Schleifband wird schneller abgenutzt.

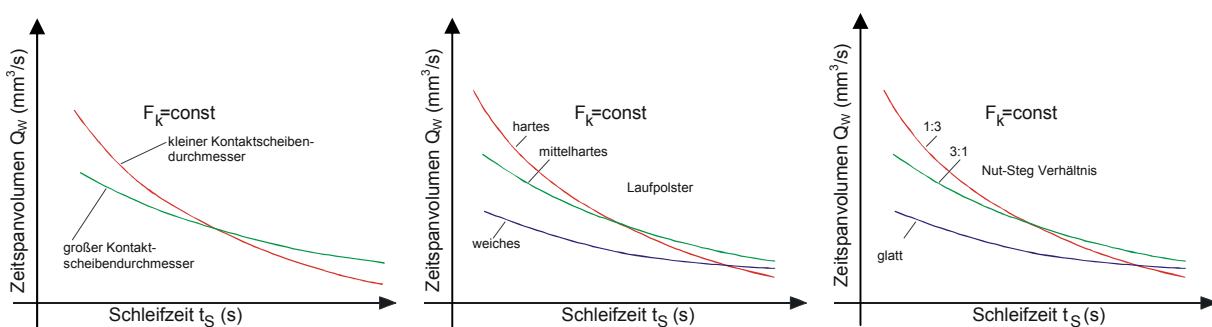


Abbildung 2.8: Einfluss von Werkzeugradius, -material und -profilierung auf das Zeitspanvolumen [KK96]

2.8.2. Lokale Prozessmodellierung des Bandschleifens mit elastischer Kontaktscheibe

Wie schon erwähnt, wurde bei der globalen Betrachtung des Prozesses ein linearer Zusammenhang zwischen der Andruckkraft und dem Spanvolumen festgestellt. Es wird vermutet, dass dieser Zusammenhang durch die Überlagerung zweier Aspekte entsteht [Sch03]:

1. Die Vergrößerung der Andruckkraft verursacht eine Vergrößerung der Kontaktfläche,
2. Die Vergrößerung der Kontaktfläche führt zu einer Reduzierung des Andrucks an den einzelnen Teilen der Oberfläche.

Dagegen konnte für das lokale Prozessverhalten in ersten Untersuchungen [Sch03] ein überproportionaler Zusammenhang zwischen lokaler Andruckkraft und lokalem Abtrag ermittelt werden.

Um den Bearbeitungsprozess genau zu beschreiben, muss deshalb die Andruckverteilung in der Kontaktzone bestimmt werden. Daraus lassen sich lokale Abträge durch eine multifaktorielle Analyse bestimmen (siehe Abbildung 2.9).

Bei der Betrachtung lokaler Prozesszusammenhänge wird die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstücks in „diskrete Schleifelemente“ unterteilt [Ham98, Sch03], bei denen

2. Stand der Technik im Bereich des Bandschleifens

von einer konstanten Andruckkraft und Schnittgeschwindigkeit ausgegangen werden kann. Für jedes diskretes Schleifelement in der Kontaktzone muss dann die lokale Andruckkraft berechnet werden. Der Satz aller lokalen Andruckkräfte für eine Kontaktsituation wird als *Andruckverteilung* bezeichnet.

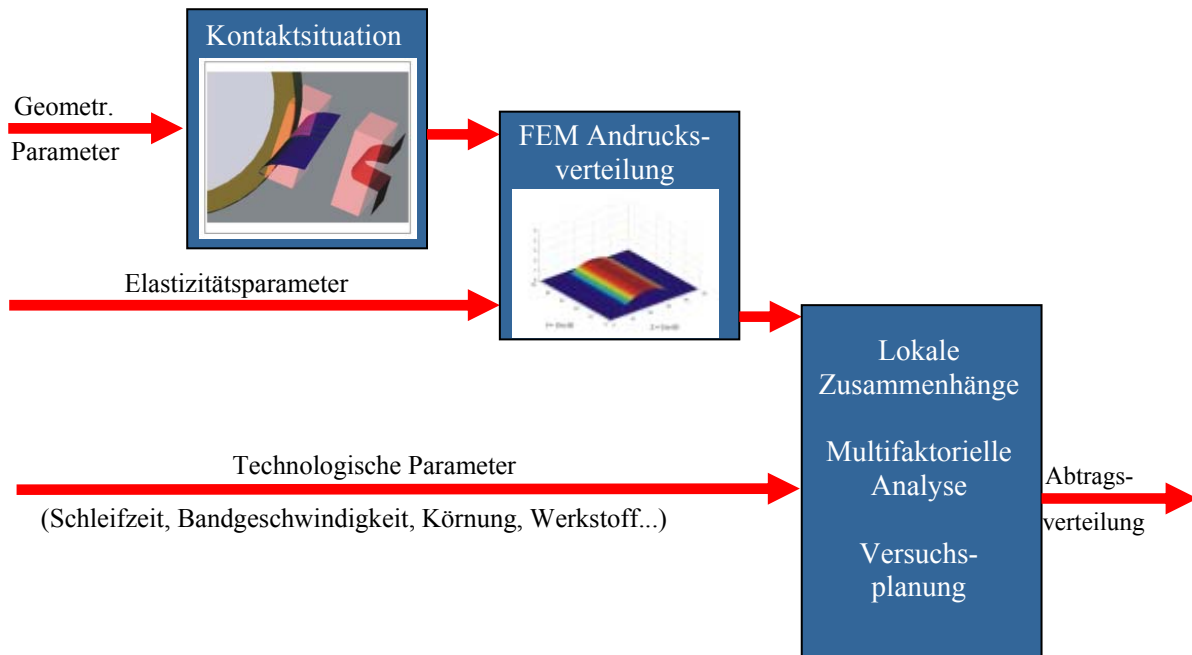


Abbildung 2.9: Bandschleifmodell mit den lokalen Zusammenhängen [CK+03]

Kapitel 3

Automatisierung der Bandschleifprozesse

Bis Anfang der neunziger Jahre wurde die Bandschleifbearbeitung von komplexen Freiformflächen zum größten Teil noch manuell durchgeführt. Um diese durch hohe körperliche Belastungen gekennzeichneten Arbeiten zu reduzieren und gleichzeitig eine Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit zu erzielen, wurden verschiedene Industrieroboterzellen für das industrieroboter-gestützte Bandschleifen entwickelt.

Diese Lösungen haben im letzten Jahrzehnt in vielen Anwendungen in der Großserienfertigung die manuelle Schleifbearbeitung verdrängt. Angewendet in der Sanitärarmaturenindustrie haben industrieroboter-gestützte Anlagen für das Bandschleifen die Leistungsfähigkeit für die Feinbearbeitung von komplexen Freiformgeometrien gezeigt [Sch03].

3.1. Industrieroboter-gestütztes Bandschleifen

Die Industrieroboter sind nach der VDI-Richtlinie 2860 (VDI = Verein Deutscher Ingenieure) als universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen definiert. Die Bewegungen der Industrieroboter sind im Unterschied zu nicht flexiblen Automaten frei programmierbar. Sie sind mit verschiedenen Sensoren, Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können verschiedene Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.

Ein Industrierobotersystem besteht in der Regel aus einem mechanischen Manipulator (Roboterarm) mit mehreren Achsen (siehe Abbildung 3.1), der durch Steuerungseinheit und Senso-

3. Automatisierung der Bandschleifprozesse

rik reguliert wird. Die Programmierung erfolgt über ein Programmierhandgerät oder einen externen Rechner.

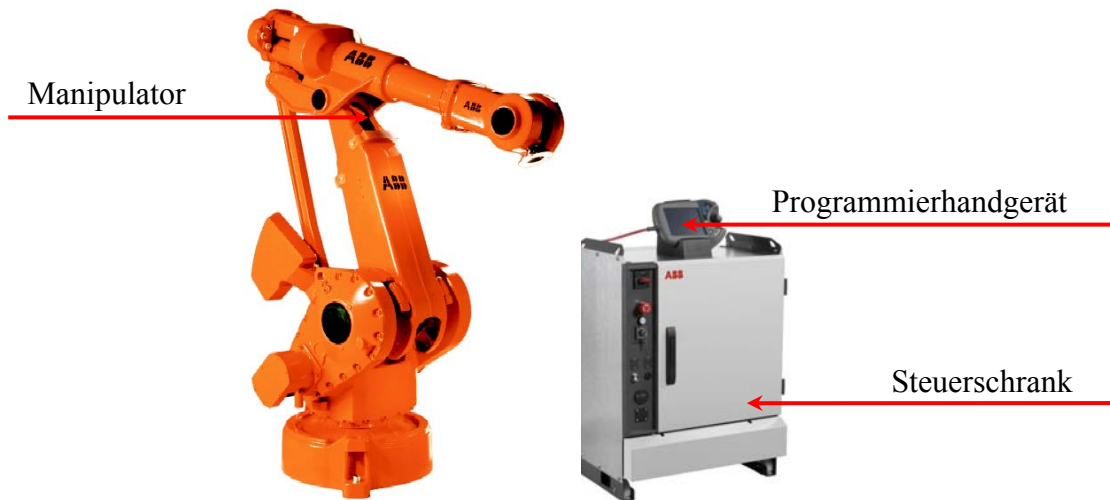


Abbildung 3.1: 6-Achsen Industrieroboter mit Steuerschrank [ABB]

Moderne Industrieroboter sind aufgrund ihrer vielfältigen Ausführungsformen im Hinblick auf die Manipulatorkonfiguration, Steuerung, Sensorik und Programmierung extrem flexible Geräte, die für viele Anwendungen benutzt werden können. Die Flexibilität erlaubt die Fertigung und Handhabung kleiner Losgrößen und verschiedener Varianten der Produkte in einer Fertigungszelle mit demselben Gerät. Industrieroboter sind heute ein wichtiger Bestandteil vieler automatisierter Fertigungsprozesse.

Dank der Entwicklung moderner Technologien sinkt der Preis der Industrieroboter kontinuierlich. Dadurch steigt die Wirtschaftlichkeit der Roboteranwendungen, besonders im Fall einer zeitgleichen Steigerung der Lohnkosten. Ein Vergleich zwischen den Trends bei den Lohnkosten und den Preisen der Industrieroboter in Deutschland in den letzten 15 Jahren ist in Abbildung 3.2 gegeben und spricht deutlich für eine Erweiterung der Roboteranwendungen.

Die Zahl der installierten Industrieroboter steigt ständig. Ende 2004 waren ca. 850.000 Industrieroboter weltweit installiert, davon 42% in Japan, 14,2% in Deutschland und 13,6% in den USA [WoR05]. Die Roboter können heute bei vielen Industrieanwendungen wirtschaftlich eingesetzt werden, was durch eine Vielfalt von Sensoren und Effektoren ermöglicht wird.

3. Automatisierung der Bandschleifprozesse

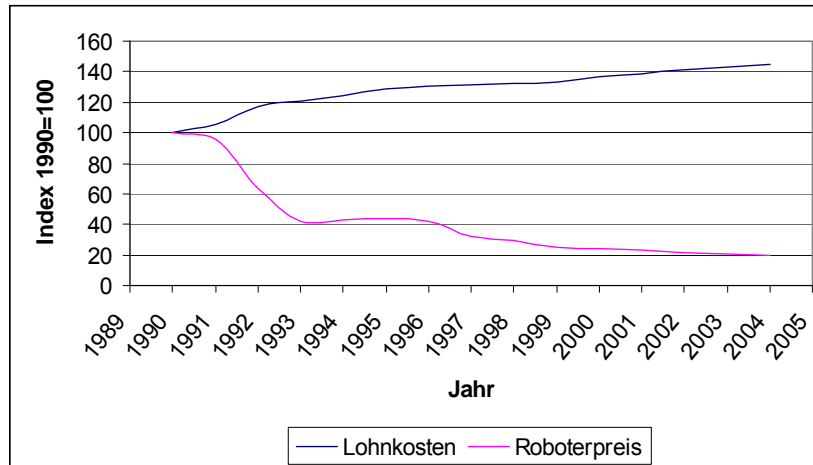


Abbildung 3.2: Preis-Index der Lohnkosten und Roboterpreis-Index in Deutschland [WoR05]

Die sich schnell entwickelnde Automobilindustrie hat den Einsatz beim Schweißen zum Haupteinsatzgebiet der Industrieroboter gemacht. In Deutschland werden ca. 30% aller installierten Roboter (siehe Abbildung 3.3) für das Punkt- und Bahnschweißen eingesetzt. Einer der größten Wachstumsbereiche für den Industrierobotereinsatz in der Zukunft ist die Montage. In diesem Bereich wird eine hohe Präzision beim Zusammenfügen der Bauteile gefordert, was erst mit der Anwendung von modernen, hochpräzisen Sensoren möglich wird. Weitere große Anwendungsbereiche für Industrieroboter sind die Handhabung verschiedener Materialien, das Palletieren und Kommissionieren, Beschichten usw.

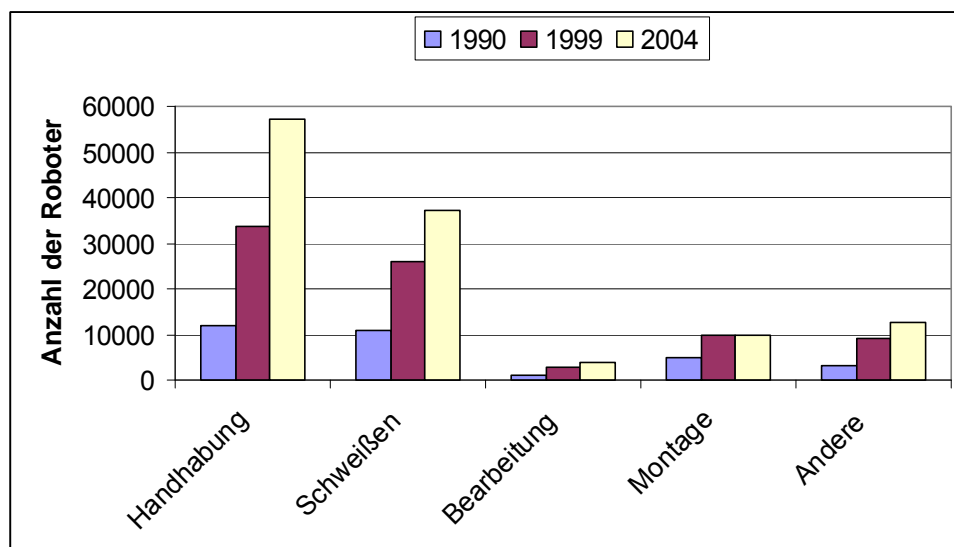


Abbildung 3.3: Anzahl der Industrieroboter in Deutschland [WoR05]

3. Automatisierung der Bandschleifprozesse

Die Zahl der Roboteranwendungen bei den verschiedenen Bearbeitungsvorgängen, zu denen das Bandschleifen zählt, ist in den letzten Jahren auch gestiegen. Die Roboter werden neben dem Schleifen, sehr oft beim Entgraten und Polieren eingesetzt. Der Roboter muss in der Lage sein, Bearbeitungsbahnen zu folgen und sie ggf. mittels Sensoren zu erfassen.

Aufgrund der vielen Freiheitsgrade, des großen Arbeitsraumes und der inzwischen geringen Kosten (von etwa 25-50 Tausend Euro pro Anlage, in Abhängigkeit von Handhabungskapazität und Ausstattung, was etwa ein Viertel des Preises von vor ca. 15 Jahren ist) werden für Bandschleifanwendungen in der Regel 6-Achsen Industrieroboter eingesetzt. Bisherige Applikationen haben gezeigt, dass die Wiederholgenauigkeit eines solchen Roboters von unter 0,1 mm bei einer gemessenen absoluten Positioniergenauigkeit von ca. 1-2 mm (je nach Lage im Arbeitsraum) für einen stabilen Prozess ausreichend ist [Sch03].

Als Effektor des Roboters kann im Bandschleifprozess entweder das Werkzeug (Variante „werkzeuggeführt“) oder den Greifer mit dem Werkstück (Variante „werkstückgeführt“, siehe Abbildung 3.4) eingesetzt werden. Wenn das Werkstückgewicht es zulässt, wird in der Regel die werkstückführende Variante vorgezogen.

Weiterhin wird beim industrierobotergetstützten Bandschleifen zwischen einem kraft- und weggeführten Prozess unterschieden. Primäre Stellgröße bei der kraftgeführten Prozessvariante ist die Normalkraft, mit der das Werkstück gegen das Schleifband gedrückt wird. Die Zustellung ergibt sich dabei aus der Höhe der Anpresskraft, dem Zustand des Schleifbandes, dem Werkstoff des Werkstücks und weiteren Prozessgrößen wie Band- und Vorschubgeschwindigkeit.

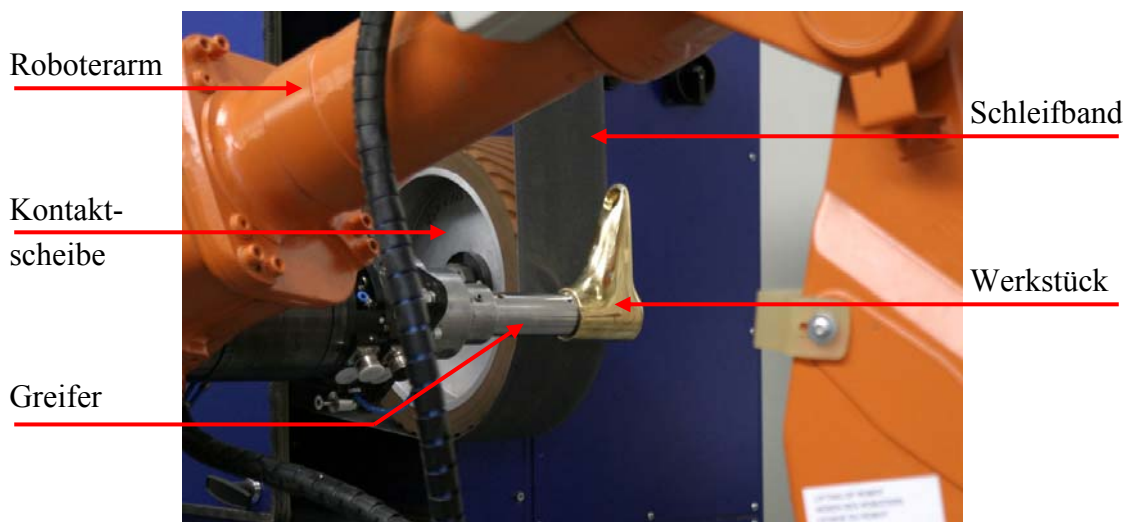


Abbildung 3.4: Das industrierobotergetstützte Bandschleifen - werkstückgeführt

Dieses Verfahren weist den Vorteil auf, dass auch nicht ebene Werkstücke bearbeitet werden können [Mey98], da durch einen konstanten Schleifdruck auf der gesamten Werkstück-

oberfläche vergleichbare Aufmaße abgetragen werden. Nachteil dieser Variante ist der Umstand, dass hohe Form- und Maßgenauigkeiten bei gleichbleibenden Zeitspanvolumina schwer realisierbar sind und nicht „auf Maß“ geschliffen werden kann. Primäre Stellgröße bei der weggeführten Prozessvariante ist nicht nur die Zustellung, sondern auch die Vorschubgeschwindigkeit (relative Geschwindigkeit zwischen dem Werkstück und Werkzeug). Bei der Bearbeitung von Freiformflächen ergibt sich durch die stark veränderlichen Krümmungsverhältnisse eine ständig variierende Ausprägung der Kontaktfläche und der Andruckverteilung [Geh93]. Sowohl bei der weg- als auch bei der kraftgesteuerten Prozessführung können die bei der Freiformflächenbearbeitung stark variierenden Kontaktverhältnisse aufgrund eines nicht genauen Andruckmodells noch nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Externe Sensoren sollen den programmierten Bewegungsablauf des Industrieroboters überwachen und ggf. Korrektur oder Abbruch des Ablaufprogrammes vorbereiten. Beim Bandschleifen kann ein Kraft-/Momentensensor, der die Bearbeitungskräfte misst, zwischen Roboterhand und Effektor eingebaut werden. Dadurch können die Bearbeitungsbahnen online korrigiert werden, um eine regelmäßige Andruckverteilung zu erzielen, was zu einem besseren Schleifergebnis führt. Durch den Einsatz von externen Sensoren wird die Flexibilität des Industrieroboters gesteigert, und eine Anpassung an eine größere Anzahl von Aufgaben wird ermöglicht.

3.2. Roboterprogrammiersysteme

Einen weiteren Schritt in der Automatisierung der Bandschleifprozesse stellen Offline-Programmiersysteme dar. Im Gegensatz zur Online-Roboterprogrammierung wird bei den Offline-Programmiersystemen die Programmerstellung von der realen Steuerung in der Werkstatt auf ein externes Rechnersystem verlagert. Die Programmierung kann auf diese Weise vor der Inbetriebnahme einer Fertigungsanlage oder parallel zu einem bestehenden Produktionsprozess durchgeführt werden, was ein großes Rationalisierungspotential darstellt.

Online-Programmierung des Roboters erfolgt entweder durch das Verfahren des Roboters in die gewünschten Positionen und Speicherung der aktuellen Achsenkonfigurationen (*Teach-In-Verfahren*) oder durch Führung des Roboters bei freigeschalteten Achsbremsen und Aufzeichnung der geführten Bahn (*Play-Back-Verfahren*). Großer Nachteil der Online-Programmierung ist es, dass die Produktionsanlage während der Programmierung nicht genutzt werden kann. Die erste Variante der Offline - Roboterprogrammierung, die einem Übergang zwischen Online- und Offline-Verfahren entspricht, war die *textuelle Programmierung*. Das Steuerungsprogramm wird erst in einer Roboterprogrammiersprache beschrieben, und die Vorgaben für einzelne Roboterpositionen werden dann numerisch oder mit Hilfe des Teach-

In-Verfahrens ergänzt. Unter dem Begriff „*grafisch-interaktive Programmierung*“ versteht man die Kombination eines Robotersimulations- und eines graphischen Offline-Programmiersystems. Zur Visualisierung und Simulation der Roboterbewegungen werden hier CAD-Modelle der Arbeitszellenobjekte (Roboter, Greifer, Werkstück, Maschine, Förderbänder etc.) verwendet. Um die Programmierung zu erleichtern, werden verschiedene Dialoge mit dem Programm eingeführt, und das Teach-In der Bearbeitungspunkte erfolgt graphisch durch einfaches Klicken auf die Werkstückoberfläche. Neben geringeren Stillstandzeiten weisen diese Systeme viele Vorteile bei der Planung der Arbeitszelle auf. Sie ermöglichen im Vorfeld die Gestaltung eines Arbeitszellenlayouts, bei dem die Zykluszeiten möglichst gering sind und Kollisionen vermieden werden [Rok99].

Abhängig vom verwendeten Abstraktionsgrad für die Programmiersprache wird zwischen *expliziten* und *impliziten* Beschreibungsformen unterschieden. Bei der expliziten Programmierung muss der Anwender alle Aktionen des Roboters einzeln angeben. Die Programmierung erfolgt durch das Anfahren von Punkten in der virtuellen Welt. Die gesamten Prozess- und Bewegungsparameter, sowie alle Stützpunkte für einzelne Bewegungsbefehle müssen vom Benutzer auf Basis seines Erfahrungswissens definiert werden.

Im Gegensatz dazu erfolgt bei der impliziten Programmierung eine aufgabenorientierte Beschreibung der Zustände und Änderungen im Umfeld des Roboters. Bei diesen Systemen muss nur noch die Aufgabe oder Teilaufgabe durch den Benutzer beschrieben werden, und das System ermittelt selbständig die erforderlichen Geometrie- und Technologieparameter. Eine vom Benutzer definierte Aufgabe kann zum Beispiel wie folgt lauten:

„Schleife Werkstueck (CAD1, Werkstoff1)“.

Dadurch wird die Aufgabe des Anwenders in einem großen Maße erleichtert. Um dies bei der Automatisierung des Bandschleifens zu gewährleisten, muss der Bandschleifprozess zunächst modelliert und simuliert werden.

3.3. Stand der Technik im Bereich der Offline-Programmier- und Simulationssysteme

Verschiedene kommerzielle Offline-Programmiersysteme, die durch zahlreiche Hilfsmittel dem Anwender eine einfache Programmierung der Roboteranwendung ermöglichen, sind zur Zeit am Markt zu finden. Diese Systeme verfügen meistens über eine Vielzahl von Schnittstellen (IGES, STEP, DXF, STL...) für den Import verschiedener CAD-Daten. Umfassende integrierte Bibliotheken für Roboter verschiedener Hersteller und anwendungsspezifische Geräte sind ebenfalls vorhanden. Dadurch sind sowohl eine realistische Darstellung der Ar-

beitszelle mit allen Komponenten als auch verschiedene Simulationsfunktionen wie z. B. Kollisionsprüfungen oder eine visuelle Beurteilung der Prozessergebnisse gewährleistet.

Das Offline-Programmiersystem IGRIP von Delmia spielt zusammen mit eM-Workplace NT (ROBCAD) von Tecnomatix eine führende Rolle am Markt [Del, Tec]. Beide Systeme nutzen die Darstellungsmöglichkeiten des CATIA-CAD-Systems und erlauben eine einfache Erstellung komplexer Simulationsprogramme. Verschiedene Postprozessoren dienen zur Übersetzung des Programms in fast alle gängigen Roboterprogrammiersprachen. Durch den Einsatz von RRS (Realistic Robot Simulation) wird der Zugriff auf die originalen Steuerungsalgorithmen einzelner Roboterhersteller ermöglicht, was den Simulationsfehler verringert. Spezielle Varianten der Systeme wurden für spezifische Anwendungen wie z. B. Schweißen, Lackieren oder Endbearbeitung entwickelt. Das Programmiersystem UltraGRIP als eine Variante von IGRIP wurde auch zur Programmierung einer robotergestützten Bandschleifzelle für die Turbinenschaufel-Bearbeitung benutzt [Del]. Im Hintergrund dieser Anwendung steht ein einfaches, auf der Kontaktzeitberechnung basierendes Prozessmodell, das u. a. die elastischen Eigenschaften des Werkzeugs nicht berücksichtigt. Deshalb kann mit Hilfe von UltraGRIP der Bandschleifprozess nur mit einer geringen, für die Praxis nicht relevanten Genauigkeit abgebildet werden.

Das System MOSES [AUT] der Firma AUTOCAM basiert auf dem CAD-System AutoCAD und nutzt die graphischen Darstellungsmöglichkeiten dieses Systems. Neben dem Basis-Modul umfasst MOSES spezifische Technologiemodule für verschiedene Anwendungen (Ausklinkungen an Profilen, 3D-Schneiden, Brenn- und Plasmaschneiden, Bahnschweißen und Beschickung von Gesenkbiegepressen), die den Benutzer bei der Roboterprogrammierung unterstützen.

Das COSIMIR Manufacturing Programmier- und Simulationssystem der Firma EF-Roboter-technik wird zur Planung und Entwicklung von Roboter- und Steuerungsprogrammen eingesetzt, sowie zur Simulation von kompletten Fertigungslinien mit allen integrierten Komponenten wie Robotern, SPSen, Sensoren und Transporteinrichtungen [EFR]. Das integrierte Offline-Programmiersystem für die Anwendungen im Bereich der Bearbeitung kann wegen der Vernachlässigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren (z. B. Ausgangsgeometrie des Werkstücks, Bandverschleiß, variierende Andruckverteilung) nur eingeschränkt für die Bahngenerierung beim Bandschleifen verwendet werden.

Alle diese Programmiersysteme weisen den Nachteil auf, dass sie dem Anwender nur geringe Möglichkeiten anbieten, sein verfahrenstechnisches Fachwissen über den Bearbeitungsprozess bei der Programmierung einzubringen [Rok99]. Spezielle Lösungen werden nur für we-

nige Anwendungen (Lackieren, Schweißen...) bereitgestellt. FAMOS Robotic der Fa. carat robotic innovation GmbH und das am Institut für Roboterforschung - Industrielle Robotik und Handhabungssysteme (IRF-IR) an der Universität Dortmund entwickelte DirectControl sind zwei Programmiersysteme, die dank ihrer Struktur und Integration spezieller Module auf die Programmierung von Bandschleifprozessen ausgelegt sind.

3.3.1. FAMOS robotic Offline-Programmiersystem

FAMOS robotic (Abbildung 3.5) ist ein von der Firma carat robotic innovation GmbH entwickeltes Offline-Programmiersystem, das auf die industrieroboter gestützten Prozesse Schleifen, Polieren, Entgraten, Wasserstrahlschneiden und Fräsen spezialisiert ist [Car].

Die Programmierung von Roboterbahnen erfolgt auf Basis vorliegender CAD-Daten des Werkstücks durch einfache Markierung der Bahnpunkte auf der Werkstückoberfläche. Die Orientierung der Bahnpunkte wird automatisch aus der Flächennormalen und der Verbindung zum nachfolgenden Stützpunkt generiert. Mit Hilfe umfangreicher Funktionen können Positionen und Orientierungen einzelner Stützpunkte einfach verändert, und die einzelnen Bahnen und Prozessparameter (Werkobjekt und Tool-Koordinatensysteme, Interpolationsart, Vorschubgeschwindigkeit, Zustellung usw.) leicht verwaltet werden. FAMOS bietet auch die Möglichkeit ein Werkzeugmodell am zu untersuchenden Stützpunkt einzublenden, was die Zugänglichkeitsanalyse ermöglicht. Die Programme in FAMOS können sowohl für werkzeug- als auch werkstückgeführte Prozessvarianten generiert werden.

Ein wichtiger Bestandteil von FAMOS sind die Postprozessoren. Die Aufgabe der Postprozessoren ist es, die Informationen, die FAMOS über das Bewegungsprogramm besitzt, in eine Roboterprogrammiersprache zu transformieren. Die Programme werden als einfache Textdateien auf der Festplatte gespeichert und müssen dann an den Roboter übertragen werden. In FAMOS können die Postprozessoren für die Steuerungen verschiedener Roboterhersteller (ABB, Kuka, Stäubli) sowie der Postprozessor für die Simulationssoftware EasyRob integriert werden. Mit den genannten Funktionen gehört FAMOS zum aktuellen Stand der Technik bei den Offline-Programmiersystemen. Leider müssen bei FAMOS, wie auch bei anderen konventionellen Programmiersystemen, die Bewegungsbahnen wegen der Ungenauigkeiten des Roboters und der CAD-Daten des Werkstücks durch „Nachteachen“ online optimiert werden. Es fehlen auch die Funktionen zur automatischen Werkstückanalyse, Bahnplanung oder Parameterbestimmung, und deshalb kann FAMOS noch nicht als aufgabenorientiertes Programmiersystem bezeichnet werden.

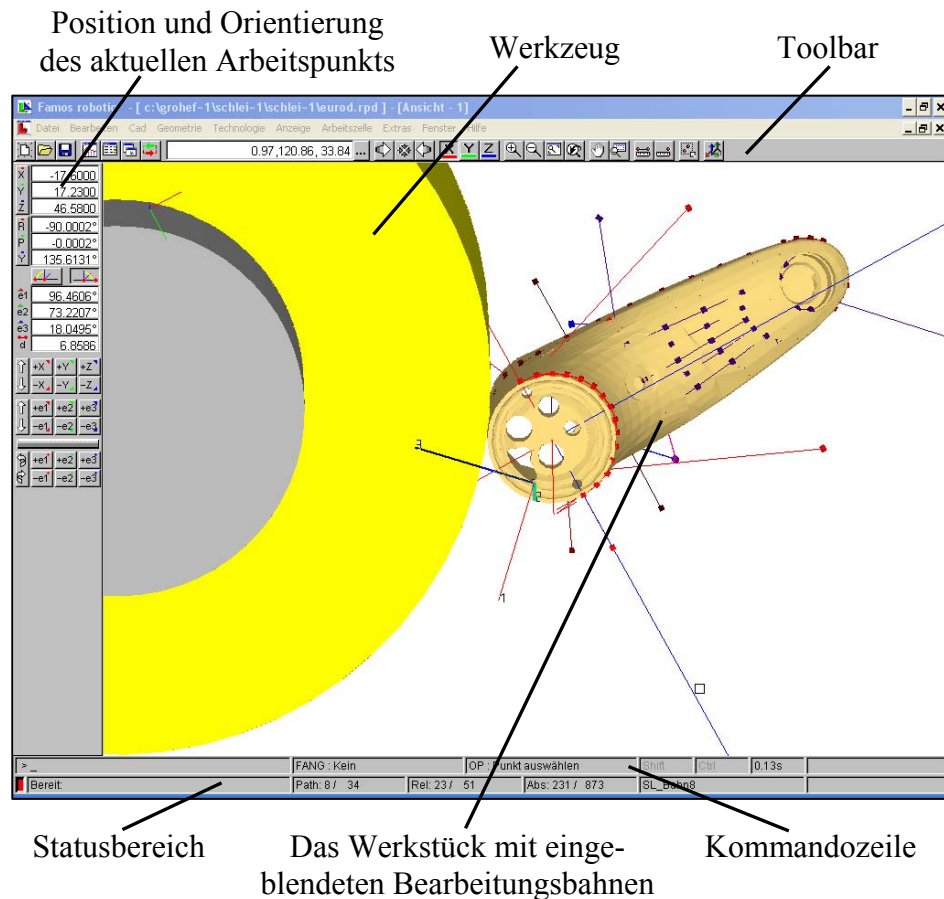


Abbildung 3.5: Offline-Programmiersystem FAMOS robotic

3.3.2. DirectControl Roboterprogrammier- und Steuerungssystem

Ein weiteres Beispiel eines Roboterprogrammier- und Steuerungssystems ist das am Institut für Roboterforschung - Industrielle Robotik und Handhabungssysteme der Universität Dortmund entwickelte System DirectControl. Dieses System sieht vor, den Roboter als Handhabungsserver in eine Automatisierungslösung einzubinden. Der zentrale Steuerrechner mit der Steuerungssoftware DirectControl versendet einzelne Bewegungspunkte und -bahnen zu dem „Server“ Roboter, der diese umgehend ausführt. Durch diesen Vorgang ist es möglich, wesentlich komplexere Anwendungsprogramme zu erstellen als dies innerhalb der Roboterprogrammiersprache möglich wäre. Das Anwendungsprogramm der Zellensteuerung läuft nicht mehr in der Robotersteuerung, sondern auf dem DirectControl-Rechner in der Programmiersprache Delphi [Kne04].

Die Robotersteuerung erhält während der Ausführung einzelne Bewegungsvorgaben und führt diese direkt aus. Durch die Einbindung von Roboter- und Prozesssimulationen (typische Offlinefunktionalität) in die Steuerungssoftware können Bewegungsbahnen online geplant, getestet und optimiert werden, bevor sie direkt ausgeführt werden.

3. Automatisierung der Bandschleifprozesse

Die einzelnen Bahnen für die Bearbeitung werden als Schnittkurven der Werkstückoberfläche mit den temporären virtuellen Ebenen generiert. Die resultierenden Schnittkurven werden anschließend aufgelöst, um die Stützpunkte für die Bewegungsbahnen zu erhalten (siehe Abbildung 3.6). Die erzeugten Bewegungsbahnen können durch die Integration des Prozessmodells optimiert werden.

Die Integration einer RRS-Schnittstelle ermöglicht eine sehr präzise Analyse der Bewegungsbahnen, indem die originalen Steuerungsalgorithmen der Roboterhersteller benutzt werden. Durch die Beweglichkeitsanalyse auf Basis der Achsstellungen kann die am besten geeignete Roboterkonfiguration für die Ausführung einer Bewegungsbahn ausgewählt werden. So wird die parallele Planung und Durchführung von Roboterbewegungen ohne weiteren Eingriff eines Benutzers möglich.

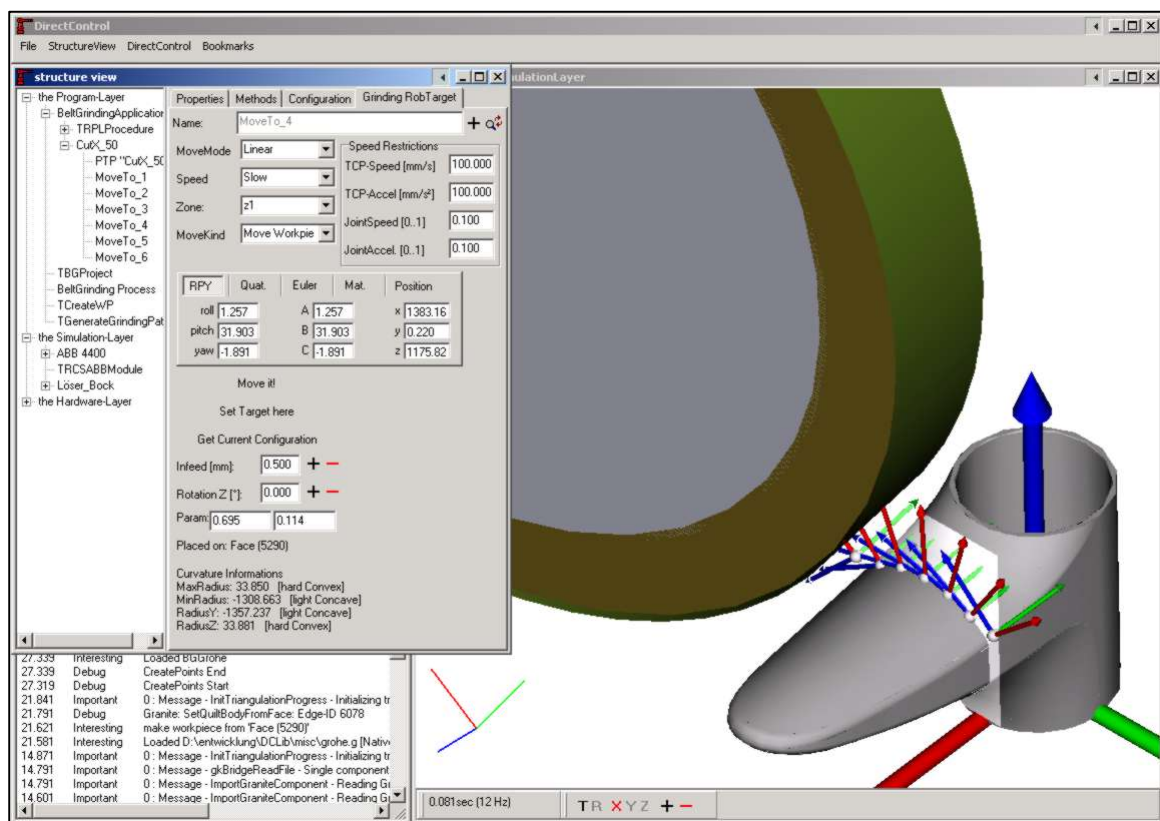


Abbildung 3.6: Roboterprogrammier- und Steuerungssystem DirectControl

3.4. Beispiel einer automatisierten Arbeitszelle für das industrierobotergetriebene Bandschleifen und Polieren von Sanitärarmaturen

Der Stand der Technik im Bereich des automatisierten Bandschleifens und die Möglichkeiten zur weiteren Optimierung des Prozesses werden konkret am Beispiel der im Rahmen des Pro-

3. Automatisierung der Bandschleifprozesse

jekts „Verfahren zur effizienten Optimierung von robotergestützten Schleif- und Polierprozessen (ePo)“ [KKS05] aufgebauten Arbeitszelle für die Bearbeitung und Nachbearbeitung von Sanitärarmaturen veranschaulicht. Das Hauptziel des ePo-Projekts, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, ist die automatische Erkennung und Beseitigung von Fehlern auf der Oberfläche der fertigen Bauteile. Der Einsatz von Industrierobotern bei der Nachbearbeitung von Werkstücken führt sowohl zur Entlastung der Arbeiter (dann, wenn es beispielsweise darum geht, die Qualität eines Werkstücks subjektiv zu beurteilen oder bei arbeitsintensiven Tätigkeiten) als auch zur Senkung der Produktionskosten.

Die Arbeitszelle besteht aus einem 6-achsigen Industrieroboter ABB 4400 mit einem Handhabungsgewicht von 45 kg, einem Bildverarbeitungssystem mit einer Umspannstation, die es ermöglicht das Bauteil auf zwei unterschiedliche Arten zu greifen, einer Bandschleifmaschine mit zwei Kontaktscheiben, zwei Poliermaschinen (eine für das Polieren und eine für das anschließende Glänzen), einem Greiferwechselsystem sowie einer auf dem Werkzeuggestisch befestigten Bauteilpalette (siehe Abbildung 3.7).

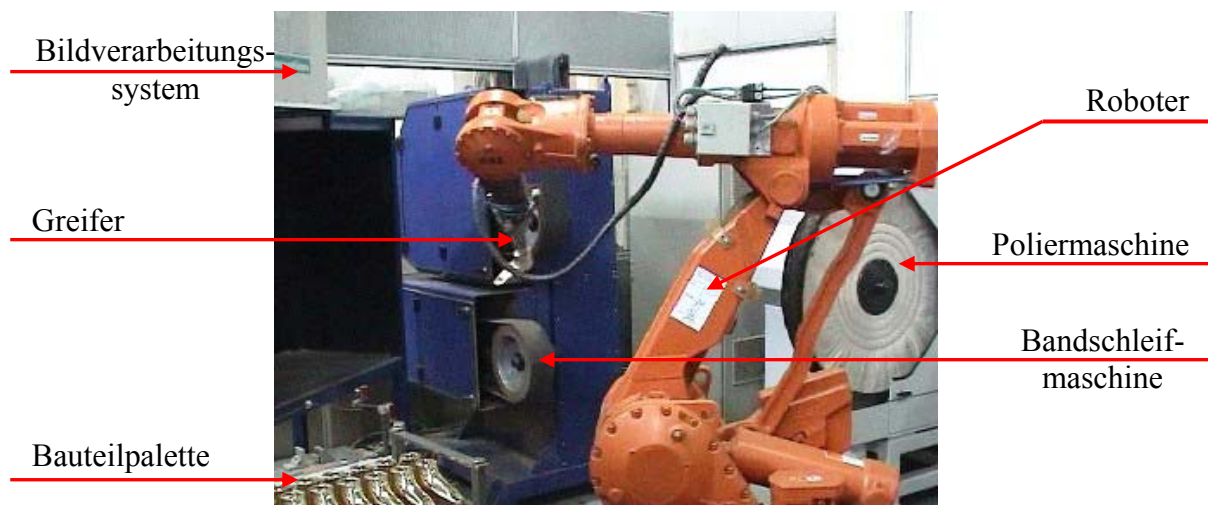


Abbildung 3.7: Arbeitszelle für die automatische Nachbearbeitung von Sanitärarmaturen

Die Bahnen für das Bandschleifen und Polieren von EURODISC-Sanitärarmatur wurden mit Hilfe des FAMOS Robotic Offline-Programmiersystems anhand der CAD-Daten des Bauteils erzeugt (Abbildung 3.8). Da die Sensorsysteme zur Vermessung der Bauteiltoleranzen und des Greiffehlers für einen wirtschaftlichen Einsatz unzureichend entwickelt sind, müssen die erzeugten Bahnen zusätzlich mit Hilfe von „Nachteachen“ am realen Roboter optimiert werden.

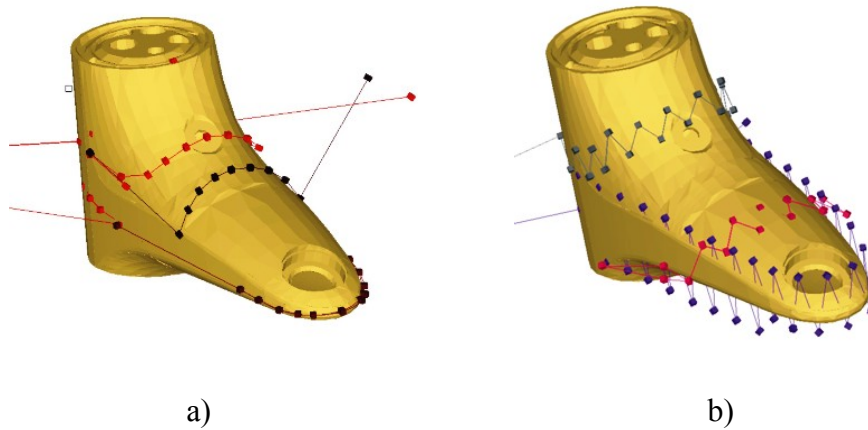


Abbildung 3.8: Stützpunkte für a) Bandschleifen und b) Polieren

Die Bearbeitung erfolgt in vier Phasen: grobes Bandschleifen (Schleifband mit Körnung P 100), feines Bandschleifen (Körnung P 280), Polieren und Glänzen.

Nach der Bearbeitung wird der Prüfvorgang durchgeführt, wobei der Roboter das fertige Bauteil mit einem speziellen Greifer greift und es zum Bildverarbeitungssystem führt. Mit der Kamera werden die Bilder der Bauteiloberfläche aufgenommen und die Fehler an der Werkstückoberfläche erkannt. Meistens stammen die Oberflächenfehler aus dem vorher durchgeführten Gießprozess. Die daraus entstehenden Fehler, wie z. B. Poren, Risse oder Gasblasen können erst nach dem Schleifen und Polieren des Werkstücks entdeckt werden. Die anderen Fehler, wie Feinstriche oder eingebrannte Polierpastereste, werden durch Schleifen und Polieren verursacht. Die Klassifizierung der Fehler erfolgt mittels spezieller Methoden der künstlichen Intelligenz (Support Vector Machine). Die fehlerhaften Bauteile werden aussortiert und anhand der Größe und Position der erkannten Fehler nachbearbeitet. Um die Zykluszeiten zu verkürzen, werden nur die Teile der Oberfläche nachgeschliffen, auf denen Fehler auftreten.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung des Nachbearbeitungsprozesses bietet sich durch eine Tiefenmessung von Oberflächenfehlern mit Hilfe von verschiedenen Abstandssensoren (z. B. Laser, präzise taktile Sensoren usw.). Anhand der Tiefeninformation können dann mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Prozessmodells die optimalen Werte der Prozessparameter (Andruckkraft, Bandgeschwindigkeit) bestimmt werden, damit die Oberflächenfehler vollständig nachgeschliffen und korrigiert werden können.

Kapitel 4

Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckverteilungsmodells

4.1. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Berechnung der Andruckverteilung

Ausgehend von der geometrischen Kontaktsituation berechnet ein vorhandenes statisches FEM-Modell die Andruckverteilung. Die Geometrie des Werkstücks in der Kontaktzone wird durch Querkrümmung, Längskrümmung, Kippwinkel und Zustellung dargestellt und zusammen mit anderen Eingangsgrößen in einer so genannten CAPP-Datei (Computer Aided Process Programming Application) [Sch03] gespeichert. Die Geometriedaten werden in der CAPP-Datei in das Höhenmodell des Stützpunktnetzes umgerechnet. Die Berechnung der Andruckverteilung erfolgt dann mit Hilfe der FE-Methode aus diesem Höhenmodell. Mit der Benutzung von CAPP-Dateien kann für verschiedene Kontaktsituationen eine für die Simulation verwendbare Datenbank erstellt werden. Die Vorgehensweise bei der FEM-Berechnung wird an dieser Stelle zusammengefasst.

4.1.1. Behandlung der Kontaktprobleme – Signorini Problem

Der Kontakt zwischen einem elastischen Körper (hier: elastische Kontaktscheibe) und einem Starrkörper (das Werkstück) wurde erstmals von Signorini [Sig33] untersucht und wird in der

Literatur als Signorini Problem bezeichnet. Beim Signorini Problem wird die Verformung eines linear elastischen Körpers durch eine reibungsfreie starre Begrenzung behindert. Auf dem Rand ($\Gamma^{(e)}$) des elastischen Körpers sind Teilränder $\Gamma_D^{(e)}$, $\Gamma_F^{(e)}$ und $\Gamma_C^{(e)}$ definiert (siehe Abbildung 4.1). Mit $\Gamma_D^{(e)}$ wird der Teil von $\Gamma^{(e)}$ bezeichnet, auf dem der Körper befestigt bzw. auf dem die Verschiebung vorgeschrieben ist. Bei der elastischen Kontaktscheibe wird mit $\Gamma_D^{(e)}$ der Bereich bezeichnet, wo das Elastomer am Metallkern befestigt ist. Der Teil von $\Gamma^{(e)}$, auf dem vorgeschriebene Oberflächenkräfte wirken, wird mit $\Gamma_F^{(e)}$ bezeichnet. In unserem Fall wird angenommen, dass an das Elastomer nur elastische Kräfte wirken. Die äußeren Kräfte (z. B. Gravitation) werden vernachlässigt. Derjenige Teil des Randes, der mit einem anderen Körper in Kontakt kommen kann, wird mit $\Gamma_C^{(e)}$ bezeichnet.

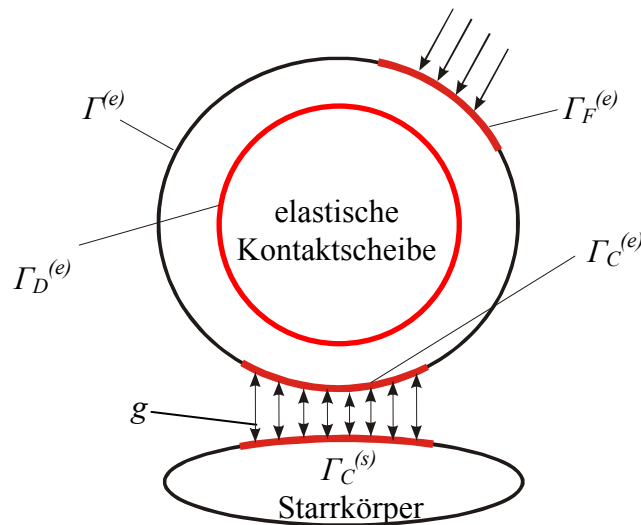


Abbildung 4.1: Signorini Problem – Kontaktkörper

Die mögliche Kontaktzone an der Oberfläche des Starrkörpers wird mit $\Gamma_C^{(s)}$ bezeichnet. Für jeden Punkt $x^{(e)} \in \Gamma_C^{(e)}$ wird der Abstand zu $\Gamma_C^{(s)}$ mit $g(x^{(e)})$ definiert. Der Abstand ist demzufolge eine Funktion aller Punkte $x^{(e)} \in \Gamma_C^{(e)}$, die im weiteren als Abstandsmaß g bezeichnet wird.

Die beiden Körper dürfen sich beim Kontakt nicht durchdringen (siehe Abbildung 4.2), d. h. die Bedingung [Sig33, Kra01]:

$$n \cdot u - g \leq 0 \quad (4.1)$$

muss erfüllt werden, wobei $n \cdot u$ Verschiebungen in Normalenrichtung sind.

Beim klassischen Signorini Problem wird ein reibungsfreier Kontakt zwischen den Körpern vorausgesetzt. Das bedeutet, dass in diesem Fall in der Kontaktzone keine Spannungen in tangentialer Richtung (σ_T) auftreten können. Es gilt:

$$\sigma_T = 0 \quad (4.2)$$

4. Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells

Die auftretenden Kontaktspannungen in Normalenrichtung in der Kontaktzone (σ_N) sind komprimierend oder gleich Null (wenn es keinen Kontakt gibt), d. h.

$$\sigma_N \leq 0 \quad (4.3)$$

Weiterhin können folgende Beziehungen aufgestellt werden [Kra01]:

- die Körper befinden sich im Kontakt: $n \cdot u - g = 0, \quad \sigma_N < 0,$
 - es gibt keinen Kontakt zwischen den Körpern: $n \cdot u - g < 0, \quad \sigma_N = 0,$
- oder zusammengefasst:

$$(n \cdot u - g) \cdot \sigma_N = 0 \quad (4.4)$$

Abbildung 4.2: Kontakt eines elastischen und eines starren Körpers

Mit den Gleichungen (4.1) – (4.4) werden die Kontaktbedingungen für das Signorini Problem aufgestellt.

Weitere Randbedingungen für das klassische Signorini Problem ergeben sich aus der Definition der Teilränder $\Gamma_D^{(e)}$ und $\Gamma_F^{(e)}$. Es gilt [Kra01, Ahn03]:

$$u = 0, \text{ auf } \Gamma_D^{(e)} \quad (4.5)$$

$$\sigma_N \cdot n = p, \text{ auf } \Gamma_F^{(e)} \quad (4.6)$$

wobei mit p äußere Kräfte bezeichnet werden.

Die Gleichgewichtsbedingung im Innern des deformierbaren Körpers wird durch folgende Differentialgleichung aufgestellt:

$$\nabla \sigma + p = 0, \quad (4.7)$$

wobei p Volumenkräfte sind. Mit der Gleichung (4.7) und den Randbedingungen (4.1) – (4.6) ist das klassische Signorini Problem definiert.

Zur näherungsweisen Verarbeitung der Differentialgleichung (4.7) wird das Prinzip vom Minimum der totalen potenziellen Energie des elastischen Körpers verwendet. Die totale potenzielle Energie wird in Form einer Variationsgleichung dargestellt [KO88]:

$$\mathcal{J} = 1/2 \cdot a(u,u) - f(u) \quad (4.8)$$

Mit dem ersten Teil der Gleichung ($1/2 \cdot a(u,u)$) wird die potenzielle Energie der elastischen Deformation beschrieben. Durch $f(u)$ wird die Energie, die durch die Wirkung der äußeren Kräfte entstanden ist, bezeichnet. Die Aufgabe in diesem Fall ist es, die Verschiebungen im elastischen Körper zu finden, für die \mathcal{J} einen minimalen Wert annimmt, was für einen Gleichgewichtszustand charakteristisch ist. Dabei muss die Randbedingung (vgl. Gleichung (4.2))

$$n \cdot u \leq g \quad (4.9)$$

erfüllt werden. Mit (4.8) und (4.9) wird ein Optimierungsproblem beschrieben, das mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) gelöst wird.

4.1.2. Das Konzept der Finite-Elemente-Methode (FEM)

Das Ziel der FEM ist es, ein kontinuierliches Problem, beschrieben mit einer Differential- oder Variationsgleichung, durch Diskretisierung in ein lineares Gleichungssystem umzuwandeln.

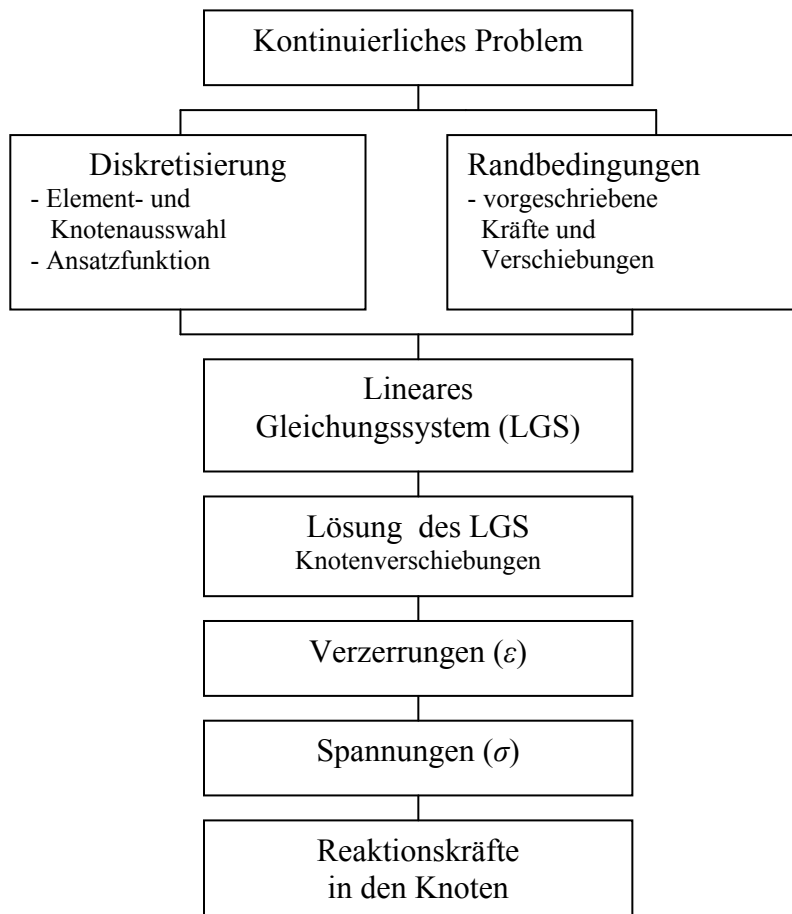


Abbildung 4.3: FEM - prinzipieller Verlauf [Kle03, Zie75]

Ein prinzipieller Verlauf der FEM bei den Problemen aus dem Elastizitätsbereich ist in Abbildung 4.3 dargestellt [Kle03, Zie75] und wird am konkreten Beispiel des Kontaktproblems beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe kurz erläutert.

4.1.2.1 Diskretisierung bei der FEM-Berechnung der Andruckverteilung

In einem ersten Schritt wird der elastische Körper (Kontaktscheibe) in die finiten Volumenelemente unterteilt. In unserem Fall werden 3D Volumenelemente mit 8 Knoten (siehe Abbildung 4.4) mit jeweils 3 Freiheitsgraden (Verschiebungen u , v , w in drei Raumrichtungen) verwendet.

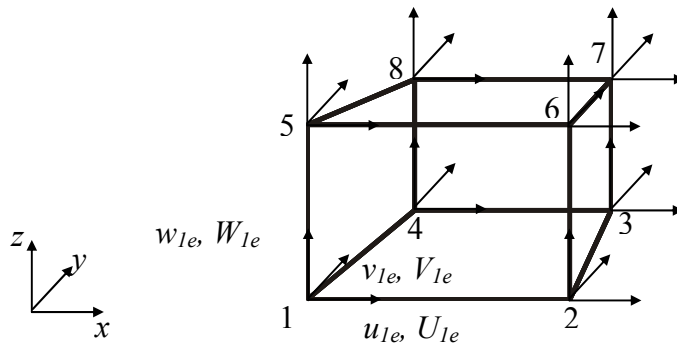


Abbildung 4.4: 3D Volumenelement mit 8 Knoten und 24 Freiheitsgraden

Für jedes Element wird der Zusammenhang zwischen den Verschiebungen $[U]_e$ und den Kräften $[F]_e$ in den Knoten des Elements bzw. die Steifigkeitsmatrix $[K]_e$ hergeleitet, wobei gilt [Kle03]:

$$[F]_e = [K]_e \cdot [U]_e \quad (4.10)$$

Mit

$$[F]_e = [F_1^T, F_2^T \dots]_e^T = [U_1, V_1, W_1, U_2, V_2, W_2 \dots]_e^T \quad (4.11)$$

und

$$[U]_e = [\delta_1^T, \delta_2^T \dots]_e^T = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2 \dots]_e^T \quad (4.12)$$

werden die Knotenkräfte und Knotenverschiebungen bezeichnet.

Um die Steifigkeitsmatrix $[K]_e$ zu bestimmen, werden zuerst die Verschiebungen jedes Punktes innerhalb des Elements in Abhängigkeit von den Knotenverschiebungen als Vektor $f(x,y,z)$ definiert [Zie75]:

$$[f]_e = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix}_e = [N]_e [U]_e = [N_1, N_2 \dots]_e \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \end{bmatrix}_e \quad (4.13)$$

4. Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells

Die Funktionen N_1, N_2, N_3, \dots sind Ansatzfunktionen, die den Verschiebungszustand innerhalb eines Elements beschreiben. Für die elastische Kontaktscheibe wird ein linearer Verschiebungszustand vorausgesetzt und die trilinearen Ansatzfunktionen werden ausgewählt.

Sind die Verschiebungen an allen Punkten innerhalb des Elementes bekannt, lassen sich auch die Verzerrungen bestimmen. Der Zusammenhang zwischen den Verschiebungen und den Verzerrungen ist aus der Elastostatik gegeben durch [Kle03]:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]^T = \\ &= \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right]^T \end{aligned} \quad (4.14)$$

Für ein diskretes Element kann diese Beziehung in einer Matrix-Form geschrieben werden, als

$$[\varepsilon]_e = [B]_e [U]_e \quad (4.15)$$

Bei bekannten Funktionen N_1, N_2, \dots ergibt sich dann aus Gleichung (4.13) die Matrix $[B]_e$.

Im nächsten Schritt soll die Beziehung zwischen Spannungen und Verzerrungen im Element bestimmt werden. Bei elastischem Verhalten gilt hier die vorausgesetzte lineare Beziehung, die aus dem üblichen isotropen Spannungs-Dehnungs-Gesetz folgt. Diese lautet [Kle03]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

sym.

oder in einer Matrix-Form geschrieben:

$$[\sigma]_e = [E] [\varepsilon]_e \quad (4.17)$$

Dabei ist $[E]$ eine Elastizitätsmatrix, die sich aus dem E-Modul und der Querkontraktion ν zusammensetzt.

Jetzt wird die Arbeit der Knotenkräften $[F]_e$ auf die virtuellen Deformationen $d[U]_e$ mit der virtuellen Arbeit der inneren Spannungen ausgeglichen, wobei gilt [Zie75]:

$$(d[U]_e)^T \cdot [F]_e = \int (d[\varepsilon]_e)^T \cdot [\sigma]_e \cdot dV = (d[U]_e)^T \cdot \int [B]_e^T \cdot [\sigma]_e \cdot dV \quad (4.18)$$

bzw.

$$[F]_e = \int [B]_e^T \cdot [\sigma]_e \cdot dV = \left(\int [B]_e^T \cdot [E] \cdot [B]_e \cdot dV \right) \cdot [U]_e \quad (4.19)$$

Die Steifigkeitsmatrix $[K]_e$ ergibt sich dann aus (4.19) und (4.10) als:

$$[K]_e = \int [B]_e^T \cdot [E] \cdot [B]_e \cdot dV \quad (4.20)$$

Die Integration erfolgt direkt oder iterativ in Abhängigkeit davon, wie komplex die ausgewählten diskreten Elemente sind. Alle Steifigkeitsmatrizen müssen in ein globales Koordinatensystem transformiert werden.

Nachdem die Steifigkeitsmatrix für jedes Element bekannt ist, werden alle Knoten und Elemente nummeriert und die Knotenverbindungen zwischen einzelnen Elementen für die gesamte Struktur bestimmt. Dies ermöglicht den Zusammenbau der gesamten Struktur und Herleitung der gesamten Steifigkeitsmatrix $[K]$.

Auf diese Art und Weise kann das kontinuierliche Kontaktproblem mit der Gleichung (4.8) beschrieben und in ein diskretes Gleichungssystem verwandelt werden [Kle03]:

$$\Delta W = 1/2 \cdot [U]^T \cdot [K] \cdot [U] - [U]^T \cdot [P] \quad (4.21)$$

wobei mit $[P]$ die noch zu definierenden äußeren Kräfte bezeichnet werden. Die diskretisierte Kontaktscheibe ist in Abbildung 4.5 gezeigt.

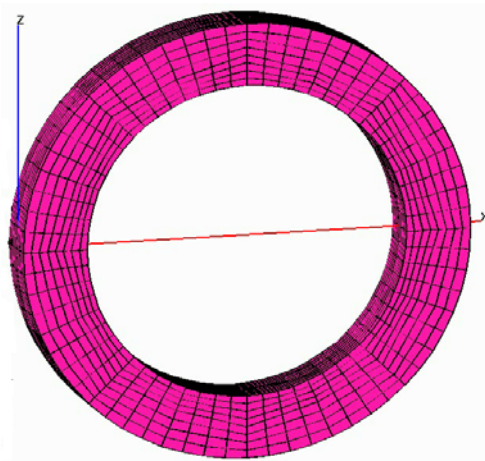


Abbildung 4.5: Diskretisierte Kontaktscheibe

4.1.2.2 Randbedingungen

In diesem Schritt werden die Randbedingungen für das Problem definiert. Es wird bei der Betrachtung des Kontakts zwischen einer elastischen Kontaktscheibe und einem starren Werkstück angenommen, dass außer den elastischen Kräften keine weiteren Kräfte in der Kontaktzone wirken, d. h.

$$[P] = \underline{0} \quad (4.22)$$

Um die Randbedingungen für Knotenverschiebungen zu definieren, muss das Werkstück als Starrkörper modelliert und die Oberfläche des Werkstücks diskretisiert werden. Materialüberlappungen müssen dabei beseitigt werden, d. h. die Ungleichung

$$[N] \cdot [U] - [G] \leq 0 \quad (4.23)$$

muss erfüllt werden. Mit der Matrix $[N]$ werden im Allgemeinen die geometrischen Beziehungen in der Kontaktzone beschrieben. In unserem Fall entspricht jedem Knoten an der Kontaktscheibe in der Kontaktzone ein Knoten am Werkstück und die Matrix $[N]$ kann als Einheitsmatrix $[I]$ betrachtet werden. Die Matrix $[G]$ ist die Abstandsmaßmatrix, deren Elemente aus den Geometriedaten der Werkstückoberfläche und der relativen Position zwischen dem Werkstück und der Kontaktscheibe bestimmt werden. Die Daten für die Abstandsmaßmatrix werden berechnet und in der CAPP-Datei gespeichert.

Hierbei erfolgt die FEM-Berechnung für ellipsoidförmige starre Körper, deren Oberflächen durch Längs- und Querkrümmungen (K_y, K_z) beschrieben werden. Die relative Position zwischen dem Werkstück und der Kontaktscheibe (Zustellung x) und der Kippwinkel (W_z) sind zwei weitere wichtige Parameter für die Bestimmung der Kontaktsituation bzw. des Höhenmodells. Der Abstand zwischen einem Knoten der Kontaktscheibe und dem entsprechenden Knoten des Werkstücks wird dann bestimmt als (siehe Abb. 4.6):

$$g = d_1 + d_2 - x \quad (4.24)$$

wobei d_1 der Abstand zwischen dem Knoten und der Tangentialebene t_K der Kontaktscheibe und d_2 der Abstand zwischen dem Knoten und der Tangentialebene t_W der Werkstückoberfläche ist.

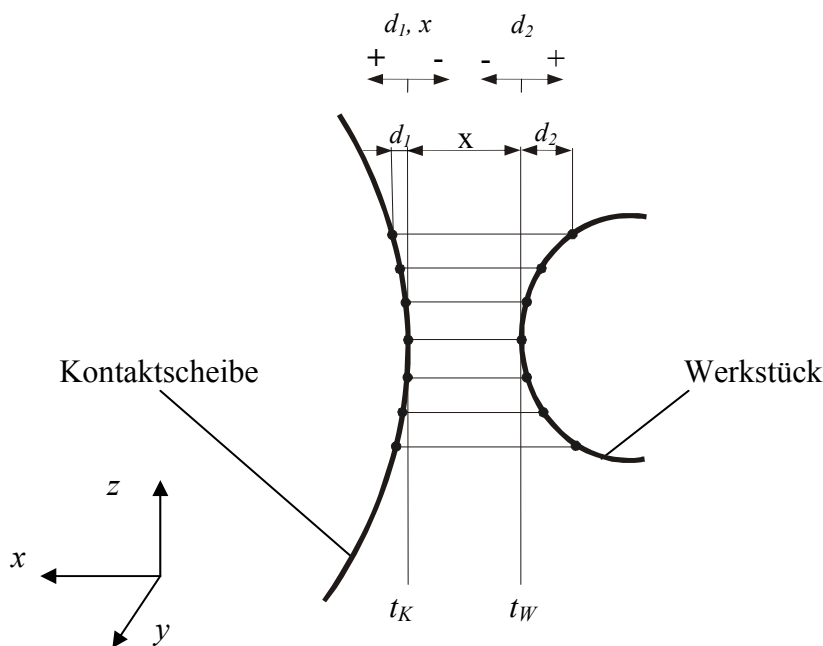


Abbildung 4.6: Bestimmung der Abstandsmaßmatrix $[G]$

Die positiven und negativen Richtungen für die Koordinaten d_1 , d_2 und x sind auch in Abbildung 4.6 gegeben.

Die schon erwähnte CAPP-Datei ist eine Austauschdatei für die FEM-Berechnung. Eine CAPP-Datei umfasst alle wichtigen Parameter für eine Kontaktsituation zwischen Werk-

stück und Werkzeug. Die Eingabedaten für eine CAPP-Datei sind (x , y und z -Richtung sind in Abbildung 4.6 gegeben):

- Geometrieparameter (Zustellung x (mm), Längskrümmungsradius R_y (mm), Querkrümmungsradius R_z (mm), Verkipfung um die Z -Achse W_z (°)),
- Parameter der Kontaktscheibe (Radius (mm), Dicke des elastischen Materials (mm), Querkontraktion ν , E-Modul (N/mm²)),
- Stützpunktnetzdaten (Koordinaten der Stützpunkte in y - z Ebene),
- Prozessparameter (Bandgeschwindigkeit (mm/s), Bandspannung (N/mm²)).

In einer CAPP-Datei werden die Daten für das Höhenmodell (Abstandsmaßmatrix) und für die Normalenvektoren auf der Werkstückoberfläche an den Stützpunkten generiert. Nach der FEM-Berechnung werden hier die Spannungen in Normalrichtungen für jeden Stützpunkt als Ergebnis der Berechnung gespeichert. In CAPP-Dateien ist auch die Speicherung der mit Hilfe des Prozessmodells berechneten Abtragswerte vorgesehen.

4.1.2.3 Erstellung des (Un)gleichungssystems

Bei der Minimierung der potenziellen Energie, die mit (4.21) gegeben ist, wird die Lagrange-Multiplikatorenregel verwendet. Das System wird durch die diskreten Nebenbedingungen (4.15) eingeschränkt und dann wird das folgende erweiterte Funktional eingesetzt [Kle01]:

$$W^* = 1/2 \cdot [U]^T \cdot [K] \cdot [U] - [U]^T \cdot [P] + [\lambda]^T \cdot ([N] \cdot [U] - [G]) \quad (4.25)$$

Für eine optimale Lösung $[U]$ müssen hierbei die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

$$\partial W^* / \partial U = [K] \cdot [U] - [P] + [N]^T \cdot [\lambda] = 0 \quad (4.26)$$

$$[\lambda]^T \cdot ([N] \cdot [U] - [G]) = 0 \quad (4.27)$$

$$[\lambda] \geq 0. \quad (4.28)$$

Die Bedingungen (4.26)-(4.28) bilden zusammen mit der Bedingung (4.23) die so genannten Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen (KKT), die mit den Kontaktbedingungen (4.1) – (4.4) für das Signorini Problem equivalent sind. Bei Kontaktproblemen erweisen sich die Lagrange Multiplikatoren $[\lambda]$ als die Kontakt-Knotenpunktkräfte [Kle03].

4.1.2.4 Lösung des Systems und Berechnung der Spannungen und Knotenkräfte

Das diskrete Linear(un)gleichungssystem (4.23), (4.26)-(4.28) wird im nächsten Schritt mit Hilfe einer iterativen Methode gelöst, und als Ergebnis werden die unbekanntes Verschiebungen $[U]$ für jeden Knoten in allen drei Raumrichtungen x , y , z bestimmt. Wenn die Knotenverschiebungen bekannt sind, können auch die Verzerrungen, Spannungen und Kräfte in jedem einzelnen Knoten und Element in drei Raumrichtungen bestimmt werden. Als Ergebnis

4. Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells

der bisherigen FEM-Berechnung werden in der CAPP-Datei die Spannungen (Drücke) in Richtung des Normalenvektors auf der Werkstückoberfläche gespeichert. Die Koordinaten der Einheitsnormalenvektoren werden in der CAPP-Datei gespeichert. Mit Hilfe der CAPP-Datei können die Ergebnisse der FEM-Berechnungen einfach graphisch dargestellt werden (Abbildung 4.7).

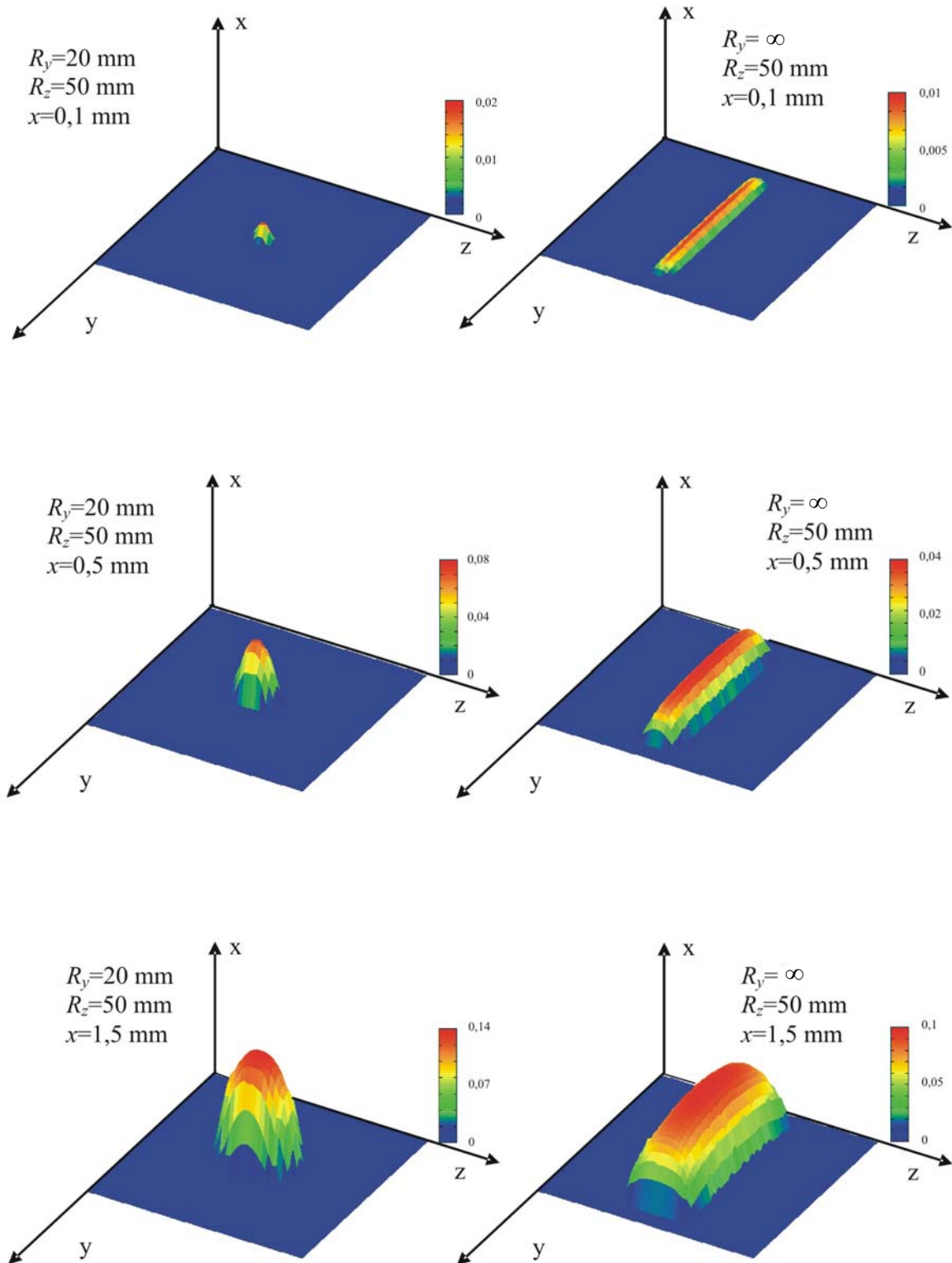


Abbildung 4.7: Graphische Darstellung der FEM-Berechnungen für die Andruckverteilung

4.2. Experimentelle Ermittlung der elastischen Werkstoffkenngrößen eines Werkzeugs

Um die Ergebnisse der FEM-Berechnung in die Praxis umsetzen zu können, muss zuerst das Andruckverteilungsmodell kalibriert werden, d. h. es muss eine Beziehung zwischen theoretisch ermittelten Werten und der Realität hergestellt werden. Die entscheidenden Faktoren für diese Beziehung sind die Werkstoffkenngrößen des Werkzeugs. Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl μ beschreiben den Zusammenhang zwischen der wirkenden Belastung und der daraus resultierenden Deformation. Leider sind diese Kenngrößen in der Regel auch dem Hersteller der Kontaktrollen und der Schleifbänder nicht bekannt. Für ein allgemeines Modell müssen diese Werte daher experimentell durch eine Kalibrierung ermittelt werden.

4.2.1. Versuchsaufbau

Die Kalibrierung erfolgt, indem zylindrische Werkstücke mit der Roboterhand gegen eine Kontaktscheibe gedrückt werden (siehe Abbildung 4.8). Für verschiedene Zustellungswerte ergeben sich verschiedene Kontaktsituationen, die mit der FEM simuliert werden können. Mit einem 6-Achsen Kraft-/Momentensensor, der zwischen Roboterhand und Werkstückhalterung montiert ist, kann die integrale Andruckkraft in der Zustellungsrichtung x gemessen werden.

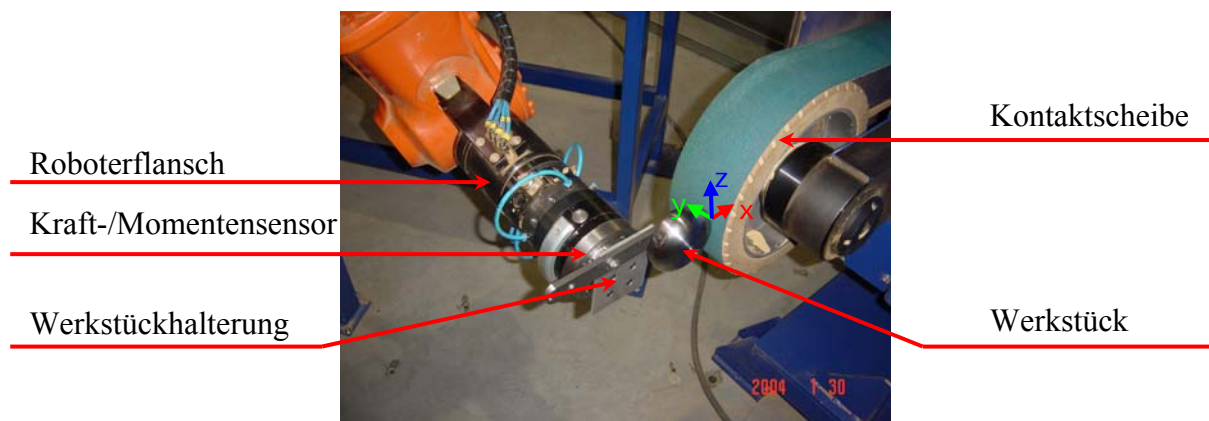


Abbildung 4.8: Messung der gesamten Andruckkraft

Hier wird ein FT Delta SI-660-60 Kraft-/Momentensensor (siehe Abbildung 4.9) der Fa. SCHUNK GmbH & Co. KG verwendet. Dieser weist einen Messbereich zwischen -660 und $+660$ N mit einer Auflösung von $0,5$ N für Kräfte und zwischen -60 und $+60$ Nm mit einer Auflösung von $0,03$ Nm für Drehmomente in drei Raumrichtungen auf.

Sechs Halbleiter-Dehnungsmessbrücken, die in drei Messsträngen im Winkel von 120° zueinander im Sensorelement angeordnet sind, erfassen die Verformung im Mikrometerbereich und

4. Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells

umwandeln sie in elektrische Signale. Die Signale werden verstärkt und über eine Kalibrationsmatrix in die Kraftkomponenten F_x , F_y und F_z und die drei Momentenkomponenten M_x , M_y und M_z umgerechnet. Die Messwerte können über eine serielle Schnittstelle oder über digitale Ein-/Ausgänge an einen externen Rechner oder direkt an die Robotersteuerung übertragen werden.



Abbildung 4.9: 6-Achsen Kraft-/Momentensensor [ATI]

In den ersten Einrichtversuchen wurde die Elastizität verschiedener Kontaktscheiben getestet, indem der Roboter flächige Werkstücke mit einem Querschnitt von $20 \times 20 \text{ mm}^2$ gegen diese Scheiben gedrückt hat. Um den Einfluss der Bandelastizität auf die Elastizität des gesamten Kontaktscheibe-Band-Systems zu überprüfen, wurden die Versuche mit und ohne Schleifband durchgeführt. Das Ergebnis eines Versuchs mit einer „weichen“ (Shore 30) und einer „harten“ (Shore 80) Scheibe ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

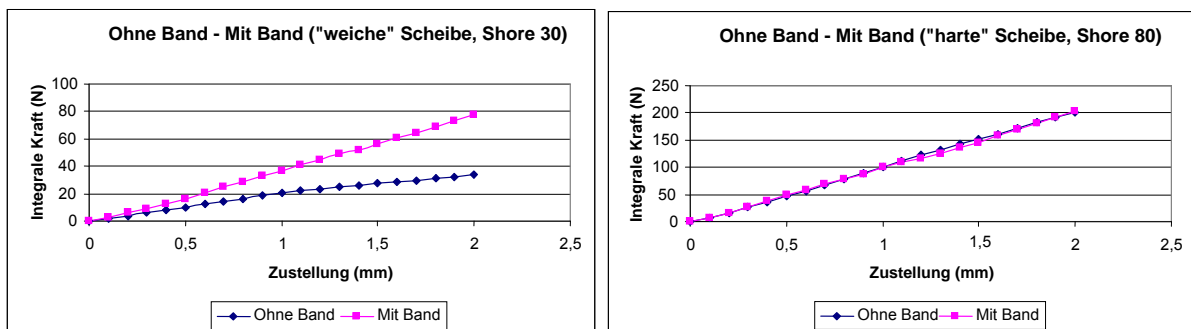


Abbildung 4.10: Kraft-Zustellung Diagramme für verschiedene Kontaktscheiben

Bei der „harten“ Kontaktscheibe beeinflusst das Schleifband kaum die Elastizität des gesamten Systems. Zur Verringerung der Komplexität der FEM-Berechnung werden für die weiteren Versuche die Kontaktscheibe und das Schleifband als ein System betrachtet, dessen Elastizitätsmerkmale zu bestimmen sind.

4.2.2. Kalibrierungsversuche

Wie schon erwähnt, wird das FEM-Andruckverteilungsmodell auf der Basis von zylindrischen Werkstücken anhand der integralen Andruckkraft kalibriert. Die Sanitärarmaturen (wie z. B. EURODISC, siehe Abschnitt 3.4) als typische Produkte mit gekrümmter Oberfläche weisen meistens die Krümmungsradien im Bereich von 10 bis 50 mm auf. Deshalb wurden hier zylindrische Werkstücke mit den Radien R_z von 10, 30, 40 und 50 mm in z-Richtung und $R_y = \infty$ in y-Richtung (siehe Koordinatensystem in Abbildung 4.8) verwendet. Die Breite der zylindrischen Werkstücke beträgt 30 mm. Mit den so gewählten Werkstücken können typische Kontaktsituationen bei der Bearbeitung von Bauteilen mit komplexer Geometrie dargestellt werden. Die Zustellung x wurde von 0 bis 2 mm mit einer Auflösung von 0,1 mm variiert und die integrale Andruckkraft (F_x) in x-Richtung wurde erfasst. Das Ergebnis der Kalibrierungsversuche ist als Zustellung-Kraft Diagramm in Abbildung 4.11 dargestellt.

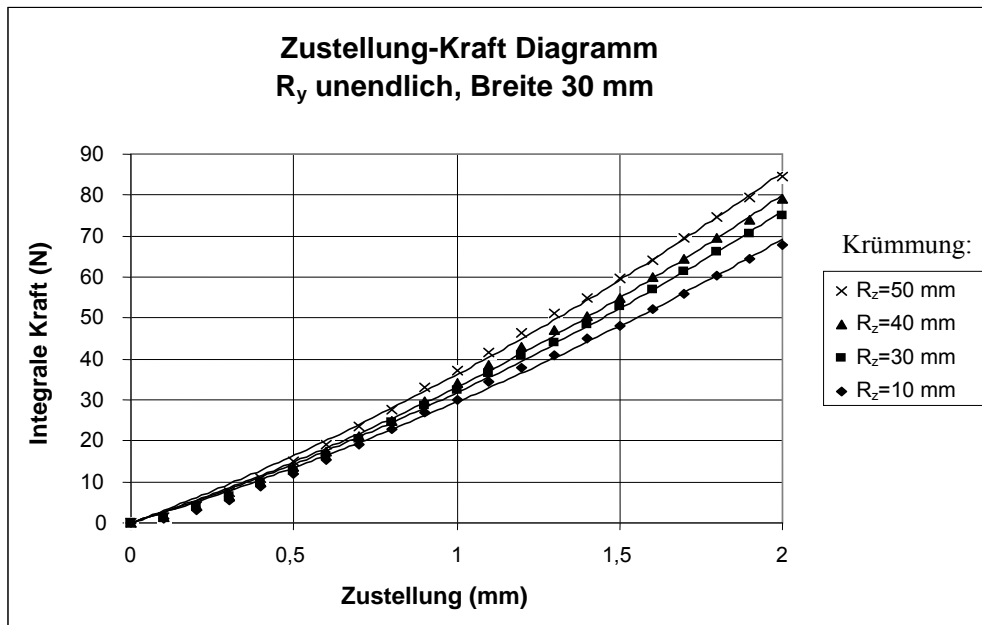


Abbildung 4.11: Ergebnis der Kalibrierversuche

Für die größeren Krümmungsradien zeigt das Zustellung-Kraft Diagramm wegen der Vergrößerung der Kontaktfläche einen steileren Verlauf. Ausgehend von diesem Diagramm konnte der Zusammenhang zwischen dem Radius der zylindrischen Werkstücke und der integralen Andruckkraft für verschiedene Zustellungen x abgeleitet werden (siehe Abbildung 4.12). Eine Kontaktflächenvergrößerung ist auch hier die Ursache für einen steileren Verlauf der Krümmung-Kraft Charakteristik bei den größeren Zustellungen.

Durch die Parameteridentifikation werden die Werte der Werkstoffkenngrößen (Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl ν) berechnet, die die Bedingungen der FEM-Berechnung

(siehe Abschnitt 4.2.2) erfüllen und zeitgleich den Fehler zwischen den experimentell ermittelten und den FEM-berechneten Werten für die integrale Andruckkraft minimieren. Durch die Variation der Elastizitätskenngrößen werden die FEM-Berechnungen an die Versuchsergebnisse für die integrale Normalkraft angepasst. Die so bestimmten Koeffizienten können als optimale, identifizierte Parameter bezeichnet werden.

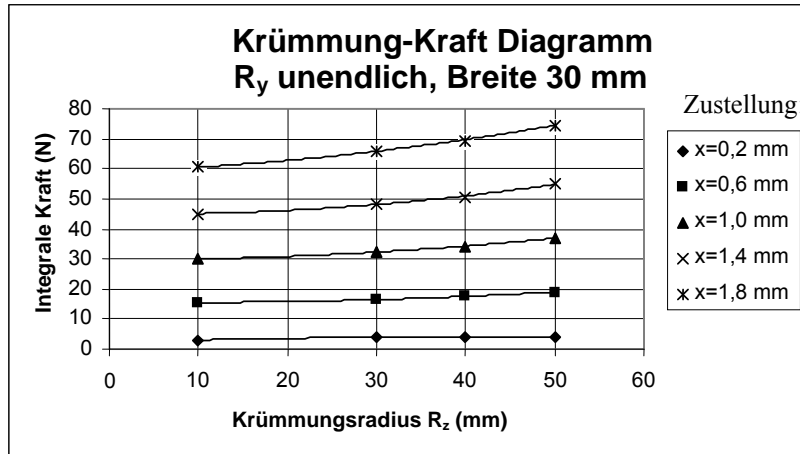


Abbildung 4.12: Krümmung-Kraft Diagramm für verschiedene Zustellungen

Für die verwendete weiche Kontaktscheibe (Shore 30) mit einem flexiblen (J-Flex) Schleifband werden auf diese Art und Weise folgende Werte der Kenngrößen ermittelt:

$$E=7 \text{ N/mm}^2, \mu=0,48$$

Diese Werte entsprechen den Werten für ähnlich flexible Systeme aus der Literatur (z. B. für weiches Gummi ist $E \sim 5 \text{ N/mm}^2$ und $\mu \sim 0,48$ [Ham98], wobei das Schleifband die Steifigkeit des Systems vergrößert). Die berechneten Werte der Kenngrößen werden dann für die weiteren FEM-Berechnungen benutzt, deren Ergebnisse mit den Ergebnissen der Verifikationsversuche verglichen werden.

4.2.3. Verifikationsversuche

Um die durch Kalibrierung ermittelten Werte für die Werkstoffkenngrößen verifizieren zu können, wurde eine Versuchsserie mit zweifach gekrümmten Werkstücken durchgeführt. Die Krümmungsradien dieser Werkstücke in der y - und z -Richtung (R_y und R_z) betragen 10, 20, 50 mm und ∞ . Dadurch ergeben sich 16 Krümmungskombinationen, die mit den verschiedenen Zustellungen verschiedene Kontaktsituationen beschreiben.



Abbildung 4.13: Zweifach gekrümmte Werkstücke

Die Breite des Werkstücks wurde für diese Versuchsserie auf $B=50$ mm festgelegt. Hier verwendete Werkstücke werden in Abbildung 4.13 dargestellt.

Abbildung 4.14 zeigt die Ergebnisse der Verifikationsversuche. Die Verläufe der Kraftkurven bei diesen Versuchen sind in ihrer Form ähnlich zu den Verläufen der Kraftkurven bei den Kalibrierungsversuchen (siehe Abbildung 4.11).

Im Rahmen des übergeordneten Projektes (siehe Abschnitt 1.2) werden effiziente Andruckverteilungsmodelle entwickelt (Neuronale Netze, Support Vector Machines), wobei die Ergebnisse der FEM-Berechnung als Basis zur Bildung dieser Modelle dienen. Die Krümmungsradien für die Verifikationsversuche wurden so ausgewählt, dass die Kontaktsituationen genau denen entsprechen, die für die Bildung der effizienten Modelle verwendet werden. Außerdem können die in Abbildung 4.14 dargestellten Diagramme als Grundlage für eine vereinfachte Kraftregelung beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktrolle verwendet werden. Um den gewünschten Abtrag an einem Bearbeitungspunkt mit definierten Krümmungen zu erzielen, ist es zunächst notwendig für eine Kombination der Prozessparameter mit Hilfe des Modells der lokalen Zusammenhänge (siehe Kapitel 6) den erforderlichen Andruck zu ermitteln. Aus der FEM-Datenbank wird dann die nötige Zustellung berechnet. Anschließend wird aus den in Abbildung 4.14 dargestellten Diagrammen die integrale Andruckkraft, als die Vorgabekraft für die Kraftregelung abgelesen.

Die FEM-Berechnungen werden für alle 4 R_z - Werte, für $R_y=10$ mm und $R_y=\infty$ und für Zustellungen von 0,5 und 1,5 mm durchgeführt. Durch Vorversuche wurde festgestellt, dass im Bereich der kleineren Zustellungen (0,1 mm) auch sehr kleine integrale Kräfte (<1 N) auftreten, die mit vorhandener Sensorik mit einer nicht ausreichenden Genauigkeit erfasst werden können (die Auflösung des Kraft-/Momentensensors beträgt 0,5 N). Deshalb kann der Relativfehler in diesem Bereich nicht objektiv bewertet werden.

4. Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells

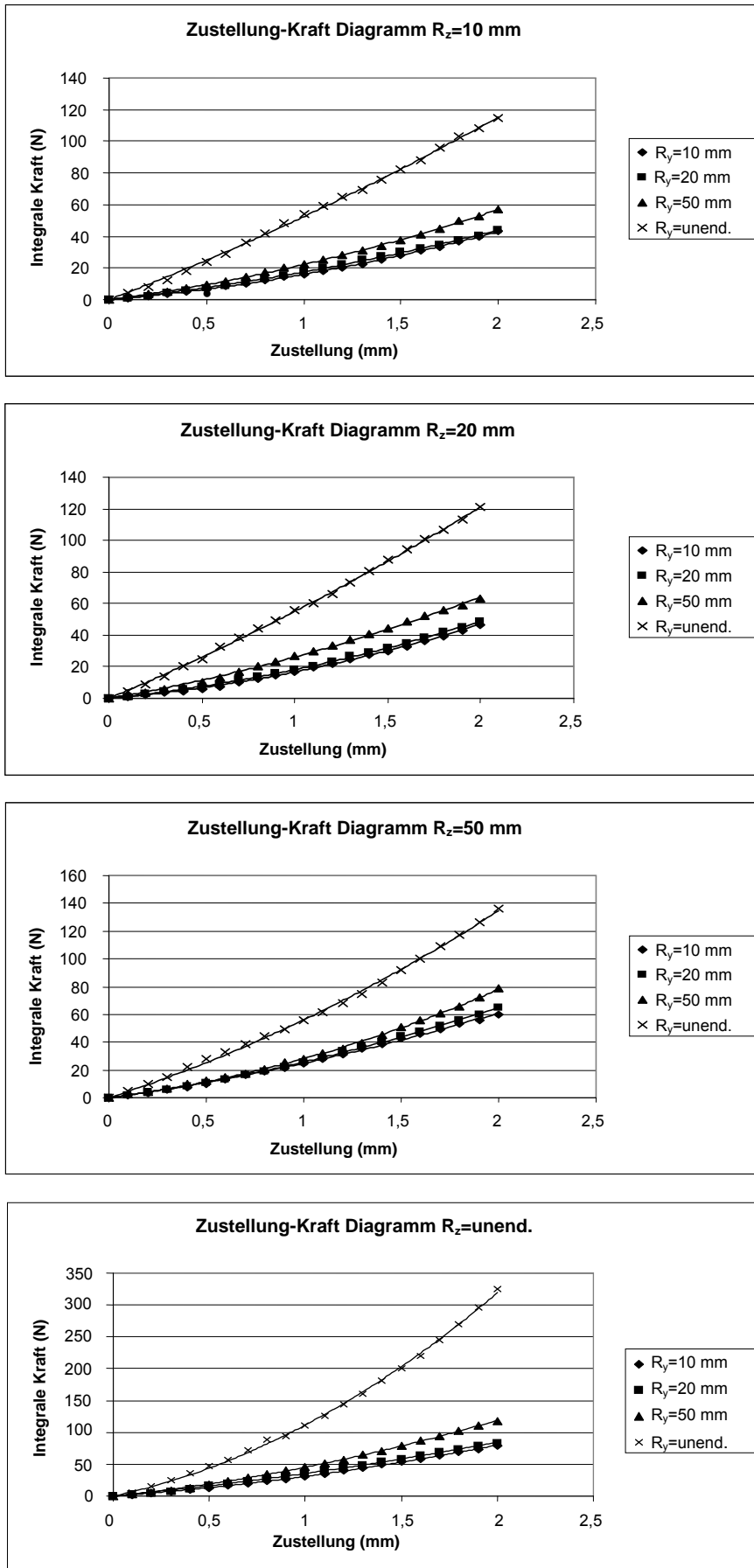


Abbildung 4.14: Ergebnis der Verifikationsversuche

4. Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells

Die berechneten FEM-Werte für die integrale Kraft sind zusammen mit den entsprechenden Versuchswerten und Relativfehlern für jeden Versuch in Tabelle 4.1 gegeben. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Verifikation des FEM-Modells an dieser Stelle nur im Bezug auf die integrale Kraft durchgeführt wurde. Eine ausführliche Verifikation des gesamten Modells erfolgt nach der Modellierung der lokalen Zusammenhänge.

Tabelle 4.1 zeigt, dass die mit Hilfe der FE-Methode berechneten integralen Kräfte im Bereich der mittleren Zustellungen (0,5 mm) gut mit den im Versuch gemessenen Kräften übereinstimmen. Dieser mittlere Bereich ist hier der entscheidende Bereich, weil die Zustellungswerte in der Praxis meistens zwischen 0,3 mm und 1 mm liegen.

R_y (mm)	R_z (mm)	x (mm)	Integrale Kraft F_i (N)		Relativer Fehler (%)
			FEM-Wert	Versuchswert	
10	10	0,5	3,99	4,5	-12,78
∞	10	0,5	19,73	20,5	-3,90
10	20	0,5	5,03	5	0,60
∞	20	0,5	23,27	24,5	-5,29
10	50	0,5	6,48	7	-8,02
∞	50	0,5	27,73	27,5	0,83
10	∞	0,5	12,4	12,5	-0,81
∞	∞	0,5	48,21	46,5	3,55
10	10	1,5	24,96	28	-12,18
∞	10	1,5	76	82,5	-8,55
10	20	1,5	30,67	30	2,18
∞	20	1,5	91,54	88	3,87
10	50	1,5	41,15	42,5	-3,28
∞	50	1,5	117,9	91,5	22,39
10	∞	1,5	82,67	54	34,68
∞	∞	1,5	236	201	14,83

Tabelle 4.1: Vergleich der FEM- und Versuchswerte für die integrale Kraft

4. Kalibrierung des vorhandenen FEM-Andruckkraftverteilungsmodells

Der größte Relativfehler des FEM-Modells tritt im Bereich der großen Zustellungen (1,5 mm) und der großen Krümmungsradien auf. Dieser Fehler wird durch die Idealisierung der elastischen Kontaktscheibe erklärt. Die Reibungskräfte werden vernachlässigt und die Verformung wird mit idealen linearen Funktionen beschrieben, was in der Praxis selten der Fall ist.

Also ist das vorhandene FEM - Modell hinsichtlich der integralen Kraft für die Berechnungen im Bereich der mittleren Zustellungen geeignet. Um die Genauigkeit des FEM - Modells zu erhöhen und seine Anwendbarkeit auf den Bereich der größeren Zustellungen zu erweitern, soll das Modell durch die Berücksichtigung der Reibungskräfte erweitert werden. Zusätzliche Reibungskräfte werden durch das Coulombsche Gesetz eingeführt, wobei der Reibungskoeffizient μ als Quotient zwischen tangentialer und normaler Kraft experimentell zu bestimmen ist.

Eine weitere Verbesserung des statischen FEM-Modells kann durch die Bestimmung des Wärmeeinflusses erfolgen. Bei der Temperaturerhöhung ändert sich die Dehnung im elastischen Werkstoff. Untersuchungen haben gezeigt, dass große Temperaturveränderungen auch den E-Modul des elastischen Werkstoffs beeinflussen. Diese beiden Phänomene können bei Bandschleifprozessen mit einem hohen Wärmeeintrag (Hochleistungsschleifen) einen signifikanten Einfluss auf die Andruck- und Abtragsverteilung haben.

Kapitel 5

Untersuchung der Störgrößen bei der Modellierung des Bandschleifens

Um den Prozess mit einer hohen Genauigkeit modellieren zu können ist es notwendig, die wichtigsten Störgrößen zu erkennen und deren Einfluss auf die Versuchsergebnisse zu minimieren. In den ersten Untersuchungen wurde der Einfluss der Störgrößen:

- Bandverschleiß,
- Temperatur,
- Messsystemungenauigkeit und
- Andruckschwankungen

auf das Abtragsvolumen als Ergebnisgröße des Bandschleifprozesses mit elastischer Kontaktrolle experimentell ermittelt. Dafür wurde eine Versuchszelle für die Untersuchung der Wirkungen der oben genannten Störgrößen bei verschiedenen Werten der Prozessparameter gebaut. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden an dieser Stelle dargestellt.

5.1. Einrichtung der Versuchszelle für die Verschleißversuche

Für die ersten experimentellen Arbeiten wurde eine Versuchszelle mit einem KUKA KR15 Roboter und eine einfache Schleifmaschine der Firma Löser (3 kW Energieaufnahme) aufgebaut. Diese Schleifmaschine besitzt keine eigene Andruckkraftregelung.

5. Untersuchung der Störgrößen bei der Modellierung des Bandschleifprozesses

Abbildung 5.1 zeigt den realisierten Versuchsaufbau, bestehend aus einer waagrecht montierten Linearführung, die auf einem Luftdruckzylinder befestigt ist. Auf der anderen Seite der Linearführung wird das Werkstück aus Baustahl mit konstantem rechteckigem Querschnitt gespannt und die ganze Vorrichtung wird am Flansch des Roboters montiert. Das Werkstück wird während eines Einzelversuches ohne Vorschubbewegung ($v_v=0$) mit einer nahezu konstanten globalen Andruckkraft, die über den Luftdruckzylinder aufgebracht wird, gegen das Schleifband gedrückt. Zur Erfassung des Abtrags wird ein Wegaufnehmer (Messtaster) eingesetzt.

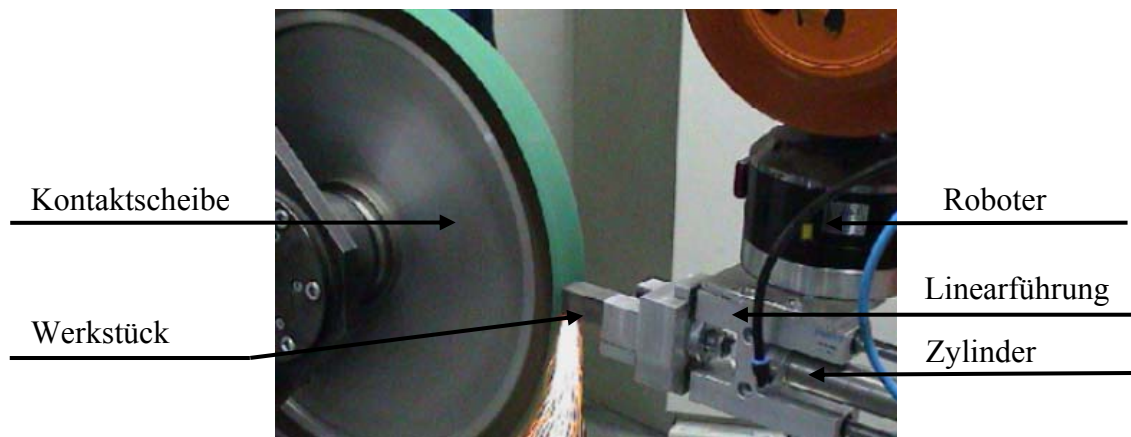


Abbildung 5.1: Aufbau der Versuchszelle

Vor und nach jedem Einzelversuch führt der Roboter die Vorrichtung mit dem Werkstück an derselben Position an den Messtaster (siehe Abbildung 5.2). Der Messtaster nimmt in beiden Fällen die Messwerte auf, wobei sich der Abtrag als Differenz dieser zwei Messungen ergibt. Nach jedem Einzelversuch wird das Werkstück mit Luft abgekühlt, um den Wärmeeinfluss auf den Schleifprozess zu minimieren.

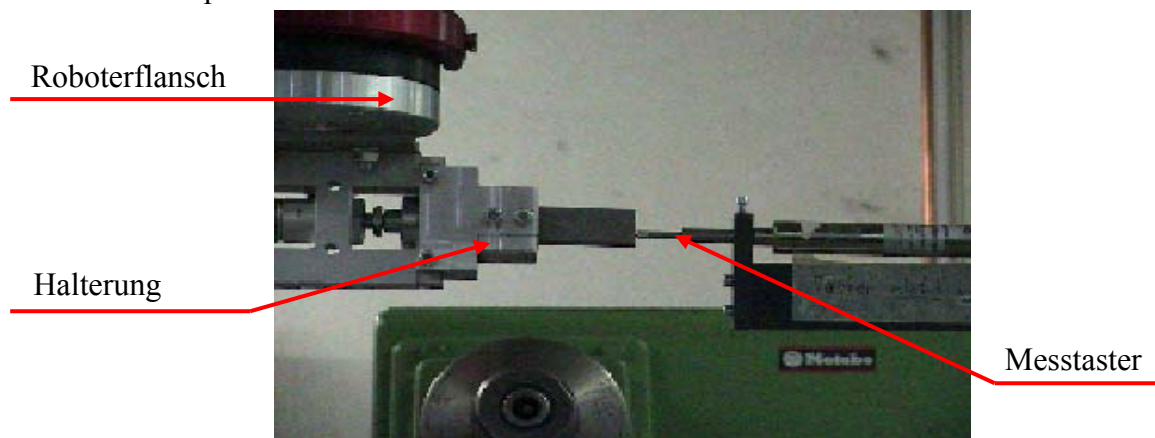


Abbildung 5.2: Messung des Abtrags mit dem Messtaster

5.2. Verschleißbetrachtungen

Mit dem obigen Versuchsaufbau wird der Abtrag am Werkstück nach einer festen Schleifzeit ($t_s = 20$ s) gemessen. Dieses wird solange wiederholt, bis das Schleifband verschlissen ist.

Für ein Schleifband wird nach jedem Einzelversuch das Zeitspanvolumen als Quotient zwischen dem erzielten Spanvolumen und der Schleifzeit berechnet. Werden diese Werte über die zugehörigen, vom Anfang des gesamten Versuchs gemessenen Schleifzeiten aufgetragen, so folgt daraus die gesuchte Abhängigkeit zwischen Zeitspanvolumen und der gesamten Schleifzeit. Diese Abhängigkeit beschreibt den Einfluss des Bandverschleißes auf den gesamten Abtrag innerhalb der Standzeit des Bandes.

Die Versuche wurden für verschiedene Bänder durchgeführt. Ein Ergebnis eines solchen Versuches ist in Abbildung 5.3 exemplarisch dargestellt.

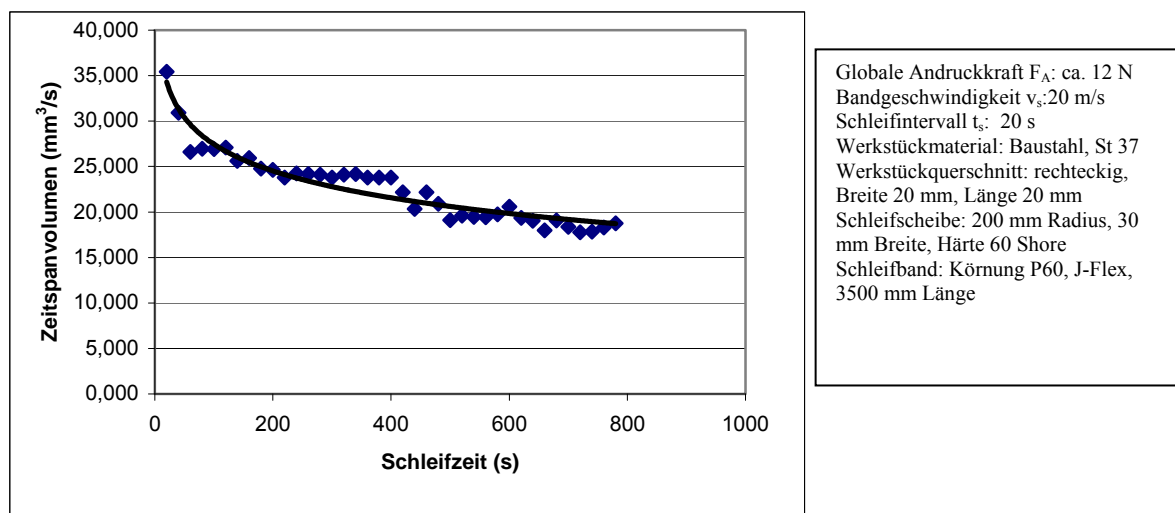


Abbildung 5.3: Zeitspanvolumen – Schleifzeit Diagramm

Aus dem Ergebnis des Versuchs ergibt sich die Verschleißkurve, die die bisherigen Untersuchungen [u. a. DB89, KK96, Mey98, Pac95] des Schleifbandverschleißes bestätigt. Der zunehmende Verschleiß des Schleifbandes verursacht die Absenkung des Zeitspanvolumens über die Nutzungsdauer eines Bandes. Das stark abfallende Zeitspanvolumen des Bandes in der Anfangsphase ergibt sich durch die Tatsache, dass die Schleifkörner im Neuzustand des Bandes sehr spitz und kantig sind und tief in den Werkstoff eindringen können. In dieser Phase splintern zunächst die weit herausragenden Schleifkörner aufgrund ihrer stärkeren Belastung ab. Die Verschleißkurve ist in ihrem weiteren Verlauf nicht mehr so steil und erhält eine annähernd lineare Form. Deshalb wird sowohl bei der Modellierung des Prozesses als auch in der Praxis die Anfangsphase des Verschleißverlaufs vermieden, indem das Band mit einem Ausschusswerkstück eingeschliffen wird.

5. Untersuchung der Störgrößen bei der Modellierung des Bandschleifprozesses

Um den Einfluss des Bandverschleißes in die Schleifmodelle einzuschließen, wurde ein Bandverschleißfaktor eingeführt (siehe Abschnitt 2.7). Der aktuelle Wert dieses Faktors ergibt sich als Quotient zwischen dem erzielten Abtrag im gegebenen Zustand des Bandes und dem Abtrag beim Neuzustand des Bandes. Die Ermittlung des Bandverschleißfaktors für einen Typ des Bandes mit bekanntem Verschleißverlauf kann entweder durch die Nummer der bereits geschliffenen Werkstücke oder durch Versuche erfolgen. Im Bezug auf den Verschleißfaktor wird der Abtrag während der Bandstandzeit durch eine Anpassung der Technologieparameter (Erhöhung der Andruckkraft oder Verminderung der Vorschubgeschwindigkeit) ausgeglichen.

Eine andere Möglichkeit den Einfluss des Bandverschleißes zu reduzieren, ist der Einsatz von Schleifbändern, deren Verschleiß möglichst minimal ist. Die auf Sinterkorund (siehe Abschnitt 2.4) basierenden Schleifbänder Sapphire Blue CB 432 EJ der Firma Hermes zeichnen sich durch ausgezeichnete Verschleißkurven aus. Im Versuch konnte ein solches Band mit einer Länge von 3500 mm eine Werkstückprobe der Größe 120 mm x 70 mm x 120 mm vom Baustahl St37 ohne eine signifikante Reduzierung des Zeitspanvolumens verschleifen. Das Ergebnis eines weiteren Versuchs mit diesem Band ist in Abbildung 5.4 dargestellt, wobei die Verschleißkurve für die ersten 20 Einzelversuche einen konstanten Verlauf annimmt. Der Einfluss des Verschleißes auf das Prozessergebnis ist somit deutlich reduziert und die Qualität des Prozesses steigt.

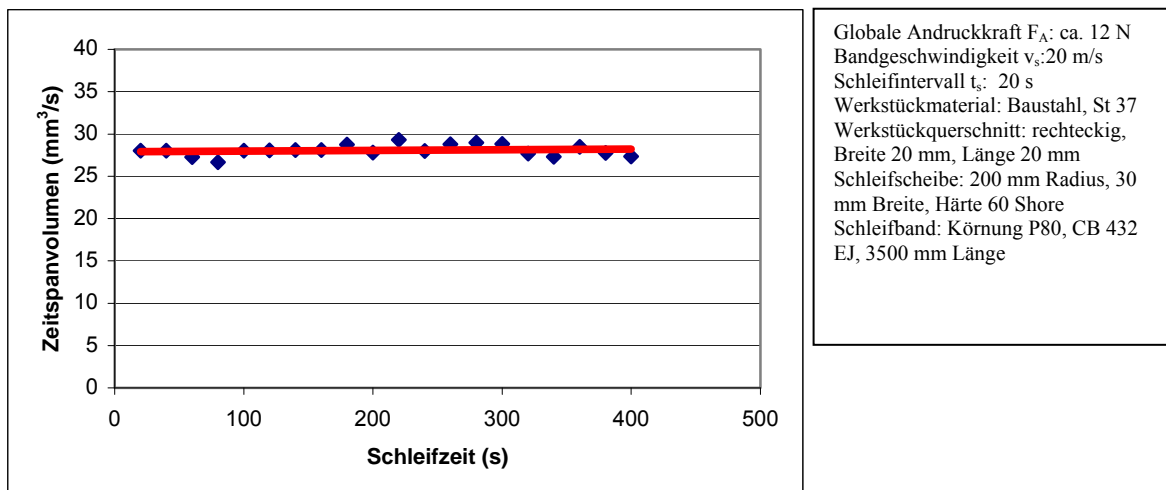


Abbildung 5.4: Zeitspanvolumen – Schleifzeit Diagramm mit konstantem Verlauf

5.3. Wärmeeinfluss

Beim Bandschleifen von metallischen Werkstücken können wegen der Reibung in der Kontaktzone so hohe Temperaturen auftreten, dass Gefügeänderungen im Werkstoff und damit

Veränderungen der Materialeigenschaften auftreten. Diese Änderungen beeinträchtigen die funktionalen Eigenschaften der bearbeiteten Oberflächen (z. B. bei Turbinenschaufeln) oder haben negative Auswirkungen auf das Erscheinungsbild eines Bauteils (z. B. bei Sanitärarmaturen). Beim Schleifen der dünnen Austrittskanten von Dampfturbinenschaufeln aus höherfesten Stählen können so hohe Temperaturen entstehen, dass es wegen einer Wärmestauung in diesem Bereich zum Schmelzen des Werkstoffs und somit zu einer Zerstörung des Bauteils kommen kann.

Aus diesen Gründen beschäftigen sich zahlreiche Forschungsprojekte mit der Untersuchung des Temperatureinflusses bei der Bearbeitung von Werkstückoberflächen. Um negative Auswirkungen auf die Werkstückqualität bei der Trockenschleifbearbeitung von verschiedenen Eisen- und Stahlwerkstoffen (C45, 100Cr6, GGG70) zu vermeiden, führte z. B. Voll [Vol01] eine Modellierung der Temperaturfelder im Werkstück in Abhängigkeit von Einstellparametern (Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Zustellung), Schleifkörperspezifikationen und Werkstückeigenschaften durch. Zur Messung der Werkstücktemperatur während der Bearbeitung kamen drei am Werkstückumfang verteilte Pyrometer zum Einsatz, die eine gemessene Intensität infraroter Strahlung in eine Spannung umwandeln. Aus den ermittelten Zusammenhängen wurde der Bearbeitungsprozess mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung unter Vermeidung thermischer Einflüsse auf die Werkstückqualität, wie Gefügeänderungen oder Eigenspannungen, optimiert. Das Modell wurde für das Außenrundsleifen mit starrem Schleifkörper aufgebaut, wobei das Zeitspanvolumen aus rein geometrischen Verhältnissen berechnet wird. Eine solche Bestimmung des Zeitspanvolumens ist beim Bandschleifen mit elastischem Kontaktelement nicht möglich, weil sich der Abtrag in dieser Prozessvariante wegen der Elastizität in der Kontaktzone nicht durch einfache Subtraktion des Schnittvolumens berechnen lässt. Daher ist das Modell von Voll für die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Prozessvariante nicht geeignet, bietet aber nützliche Ansätze, insbesondere bezüglich der statistischen Versuchspläne, die bei der Untersuchung der Bandschleifprozesse verfolgt werden können.

Fromlowitz [Fro92] untersuchte Standzeiten von Schleifbändern beim Hochleistungsbandschleifen von verschiedenen Stählen und Stahllegierungen (42 CrMo4 V, 100 Cr 6, Ck 45 N, C 60 W N). Es wurde gezeigt, dass sich die Wärme nicht nur auf die Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks negativ auswirkt. Die hohen Temperaturen bei der Bearbeitung verursachen auch einen schnelleren Verschleiß des Bandes. Um die thermisch bedingte Gefügebeeinflussung am Werkstück zu vermeiden und das Standzeitende der Schleifbänder zu bestimmen, wurde ebenfalls ein Temperaturmodell entwickelt. Bei der Temperaturmodellbildung

5. Untersuchung der Störgrößen bei der Modellierung des Bandschleifprozesses

wurde die gesamte generierte Wärmemenge bei einem Schleifprozess als Ausgangspunkt genommen. Die Wärmemenge resultiert aus der induzierten Schnittleistung, die sich aus der Tangentialkraft und der Schnittgeschwindigkeit ergibt. Mit Hilfe von Temperaturmessungen an verschiedenen Stellen der Werkstückoberfläche und anschließender approximativer Lösung eines inversen Wärmeleitungsproblems im Werkstück wurde der Anteil der gesamten Wärmemenge, der in das Werkstück fließt berechnet. Diese vereinfachte Modellbildung erlaubt allerdings keine exakte Berechnung der Temperaturverteilung im Werkstück während des Schleifens.

Weitere Autoren [KK96, WB04, Bri97, Mal92, Sha88, Het84] beschäftigten sich mit dem Temperatureinfluss auf die Werkstückoberfläche (überwiegend beim Schleifen mit starrem Werkzeug) und entwickelten Temperaturmodelle, um optimale Einstellungsparameter für die Bearbeitung zu bestimmen. Jedoch sind ihre Ergebnisse in der Regel jeweils auf einen bestimmten Prozess bzw. eine bestimmte Geometrie zugeschnitten (Außenrundscheifen, Flachschleifen usw.) und nur sehr selten auf andere Situationen übertragbar, da die mathematische Modellierung der thermodynamischen Vorgänge beim Schleifen bisher nur unter stark vereinfachenden, prozessspezifischen Annahmen möglich ist.

Um die Temperaturentwicklung im Bandschleifprozess zu untersuchen, wurde eine Versuchsserie durchgeführt, wobei Werkstücke aus Baustahl (St37) und Messing mit einem Querschnitt von 20 x 20 mm² geschliffen wurden. Die notwendige normale Andruckkraft wurde mit Hilfe eines Luftdruckzylinders aufgebracht und konstant gehalten. Die Versuche wurden statisch durchgeführt, d. h. ohne Vorschubbewegung des Werkstücks. Die Schleifzeit wurde variiert und betrug 5 s und 15 s. Die Werkstücke wurden vor dem Schleifen auf Anfangstemperaturen von 25°C und 100°C geheizt. Die Temperatur während des Schleifens wurde mit Hilfe eines Thermoelements bestimmt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

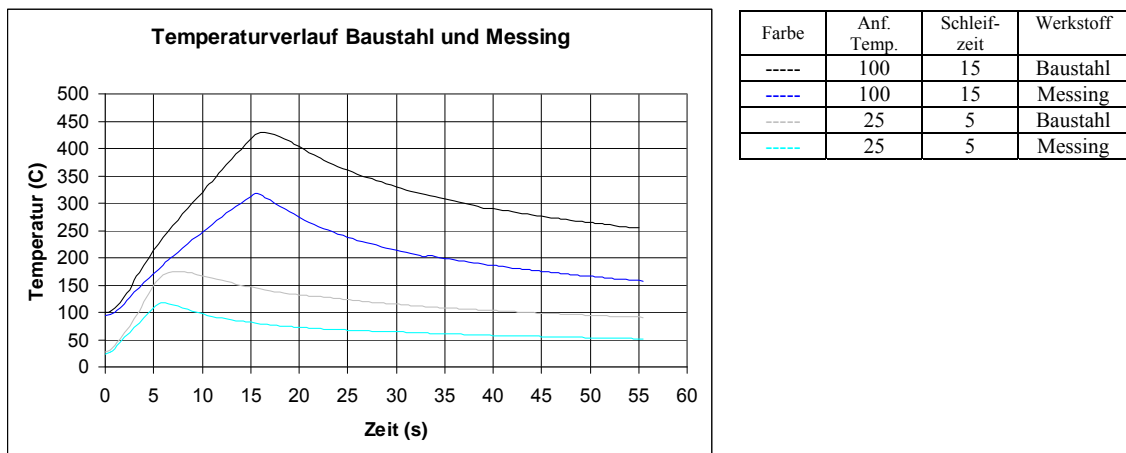


Abbildung 5.5: Temperaturverlauf beim Schleifen von Baustahl (ST 37) und Messing

5. Untersuchung der Störgrößen bei der Modellierung des Bandschleifprozesses

Wegen der Reibungskräfte zwischen Werkzeug und Werkstück steigt die Temperatur im Werkstück während des Bandschleifens. Aus der Abbildung 5.5 ist sichtbar, dass wegen unterschiedlichen Wärmeleitungseigenschaften beim Schleifen von Baustahl wesentlich höhere Temperaturen entstehen als beim Schleifen von Messing. Die maximale Temperatur bei den Versuchen wurde kurz nach Ende des Schleifprozesses erreicht. Zurückzuführen ist dies auf die Art der Messung. Da es aus technologischen Gründen nicht möglich ist, direkt an der Schleiffläche zu messen, wurde das für die Messung eingesetzte Thermoelement durch eine, wenige Millimeter (ca. 3 mm) unterhalb der Schleiffläche angesetzte Bohrung im Werkstück (siehe Abbildung 5.6) positioniert, was zu einer verzögerten Messung führte.

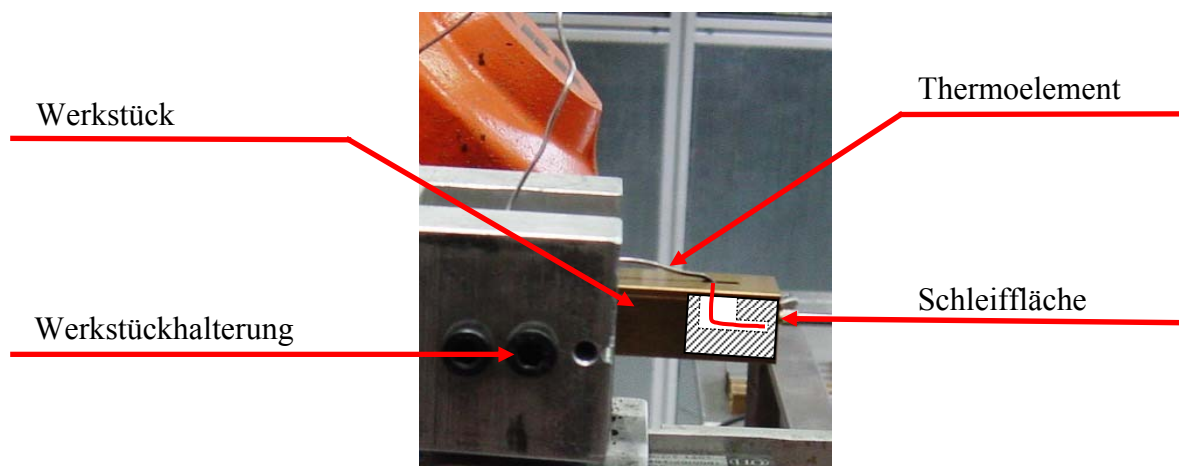


Abbildung 5.6: Temperaturmessung

Die höchste Temperatur beträgt ca. 450°C und wurde kurz nach Ende des Schleifprozesses erreicht. Die Werkstücke aus Baustahl, bei denen die Temperatur mehr als 200°C erreicht hat, wiesen deutliche Veränderungen der Oberfläche auf (Abbildung 5.7a). Dagegen konnten beim Messing keine sichtbaren Veränderungen bei den erreichten Temperaturen festgestellt werden (Abbildung 5.7b).



a)



b)

Abbildung 5.7: Werkstückoberfläche nach dem Schleifen, a) Baustahl, b) Messing

Beim Schleifen von höherfesten Stahllegierungen, die z. B. bei Turbinenschaufeln eingesetzt werden, werden noch höhere Temperaturen erreicht. Abbildung 5.87 zeigt den Temperaturverlauf, der beim Schleifen eines Inconel-Werkstoffs auftritt. Es werden Temperaturen von mehr als 550 °C erreicht. Dabei wiesen die Werkstücke aus Inconel leichte Veränderungen der Oberfläche auf, die im Weiteren auch berücksichtigt werden müssen.

Bei den bisherigen Untersuchungen konnte mit Hilfe des Thermoelements die Temperatur beim Schleifen aufgenommen werden. Jedoch misst das Thermoelement die Temperatur nur innerhalb eines kleinen Bereichs an dem es das Bauteil berührt. Daher liegt auch keine Information über die Wärmeverteilung innerhalb des Bauteils vor. Je nach Messort des Thermoelements können daher unterschiedliche Temperaturen gemessen werden. Eine ausführliche Messung der Temperatur in der Schleifzone kann mittels einer Thermokamera erfolgen, wobei auch die Temperaturverteilung an der Bauteiloberfläche ermittelt werden kann.

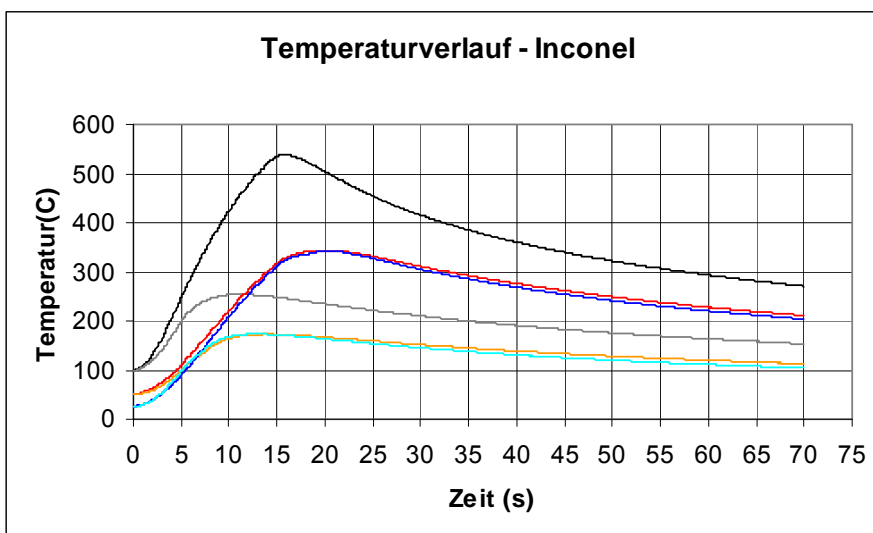


Abbildung 5.8: Temperaturverlauf beim Schleifen von Inconel

Um zu untersuchen, ob ein Einfluss der Temperatur auf das Spanvolumen beim Schleifen besteht, wurde bei der Versuchsserie zur Ermittlung der Temperatur nach jedem Einzelversuch der Abtrag gemessen. Bevor jeder Messung wurden die Werkstücke auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.9 dargestellt.

Abbildung 5.9 zeigt, dass für die gegebenen Versuchsbedingungen die Temperatur sowohl beim Baustahl als auch beim Messing keinen direkten signifikanten Einfluss auf den Abtrag hat. Die Wärme wird wegen der negativen Auswirkung auf die Werkstückoberfläche und wegen der temperaturbedingten Dehnungen von Werkstück und Werkzeug in der Kontaktzone als Störgröße für das Prozessmodell betrachtet. Deshalb müssen die Eingangsparameter bei

der Prozessplanung so gewählt werden, dass die Werkstücktemperatur nicht zu hoch wird und keine negativen Auswirkungen auf die Prozessqualität entstehen.

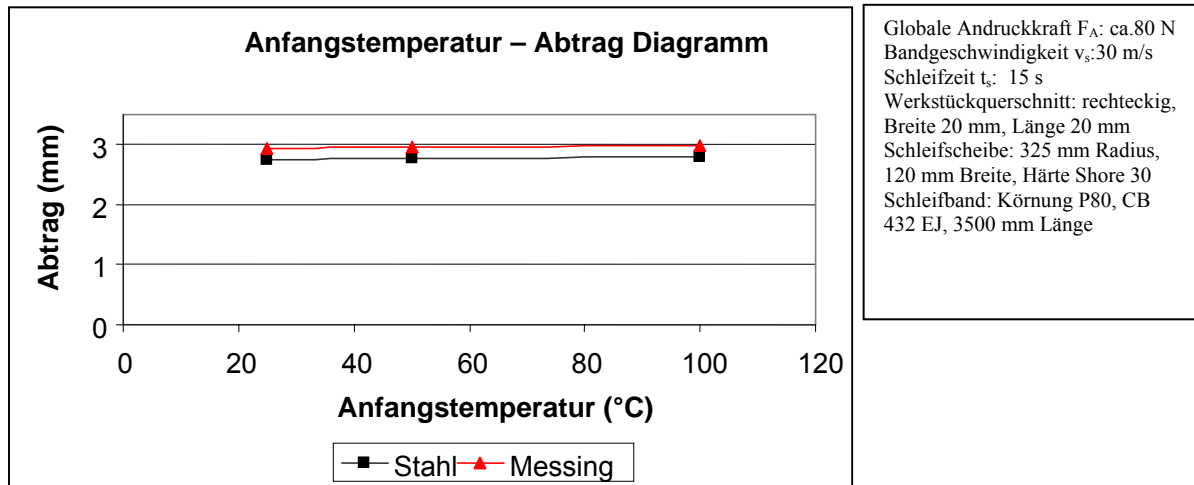


Abbildung 5.9: Einfluss der Temperatur auf den Abtrag

5.4. Messsystemfehler als Störungsgröße bei der Prozessmodellierung

In den ersten Versuchen zur Bestimmung des Schleifbandverschleißes mit nicht regelmäßiger Abkühlung des Werkstücks wurde ein erheblicher Einfluss der Werkstücktemperatur auf die gemessenen Werte des Spanvolumens festgestellt (siehe Abbildung 5.10). Die Sprünge in der Verschleißkurve entsprechen hier den Stellen, an denen das Werkstück aus Baustahl St37 abgekühlt wurde. Die Temperaturdifferenz des Werkstücks im abgekühlten Zustand (20 °C) und im nicht gekühlten Zustand (150 °C) betrug ca. 130 °C.

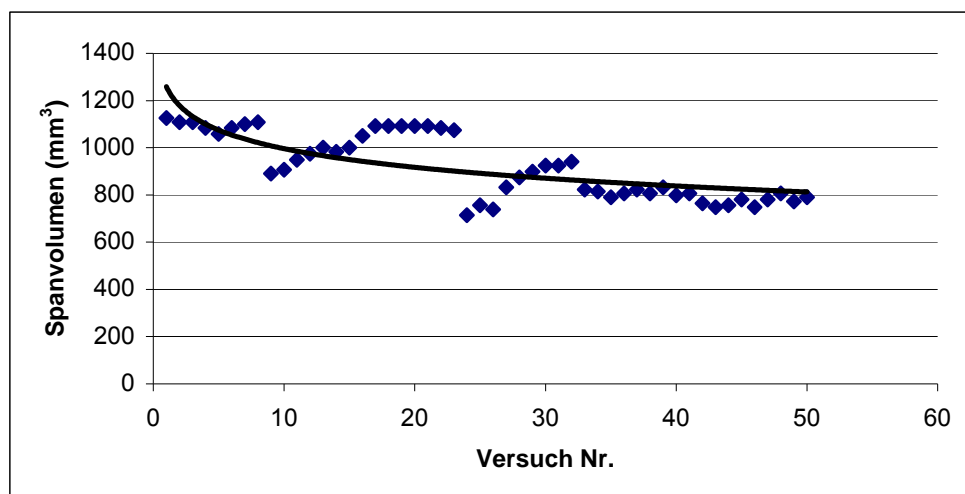


Abbildung 5.10: Temperaturbeeinträchtigte Messungen des Spanvolumens

Die Versuche zur Ermittlung des Wärmeeinflusses (siehe Abschnitt 5.3) haben jedoch gezeigt, dass die Prozesstemperatur das Spanvolumen nicht signifikant beeinflusst. Die Sprünge in der Verschleißkurve (siehe Abbildung 5.10) wurden mit den durch die Temperatur verursachten Werkstückdehnungen und dem dazugehörigen Messsystemfehler erklärt. Dieser Zusammenhang wurde in einem zusätzlichen Versuch bestätigt, wobei das Werkstück direkt nach dem Schleifen ohne Kühlung an die Position am Messtaster geführt wurde. Da die Dehnungen während der Kühlung immer kleiner wurden, veränderten sich entsprechend die Messwerte des Messtasters (Abbildung 5.11). Der Unterschied zwischen den gemessenen Werten am Anfang und am Ende des Abkühlungsprozesses ist in der Abbildung deutlich zu sehen. Deswegen müssen die Werkstücke während der Durchführung der Versuchsserie durchgehend abgekühlt werden. Auf diese Weise wird der Einfluss von Wärmedehnungen auf die gemessenen Abtragswerte verringert.

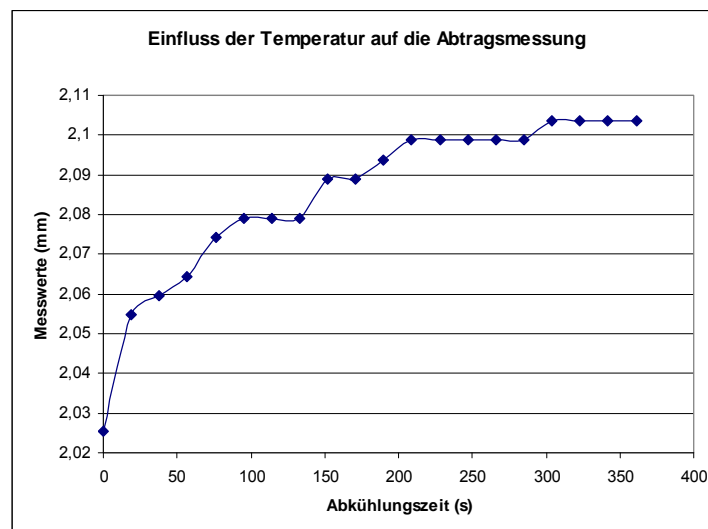


Abbildung 5.11: Einfluss der Werkstückdehnungen auf die Abtragsmessung

Neben den Temperaturdehnungen des Werkstücks beeinflusst auch der Fehler des Roboters bei der Positionierung am Messtaster die gemessenen Abtragswerte. Nach der Herstellerangaben (ABB, Kuka) beträgt die Wiederholgenauigkeit eines 6-achsigen Roboters 0,1-0,2 mm, je nach Lage im Raum. Dies wurde auch durch eigene Versuche bestätigt.

Um den durch die Wiederholungsgenauigkeit des Roboters verursachten Fehler zu reduzieren und den gemessenen Abtragswert entsprechend zu korrigieren, werden zusätzlich ein Laserabstandsensor und eine an der Werkstückhalterung angebrachte Platte (siehe Abbildung 5.12) eingesetzt. Der unkorrigierte Abtragswert a_{uk} wird dann als Differenz der Messtasterwerte vor (MT_v) und nach (MT_n) dem Schleifen berechnet, d. h.:

$$a_{uk} = MT_v - MT_n \quad (5.1)$$

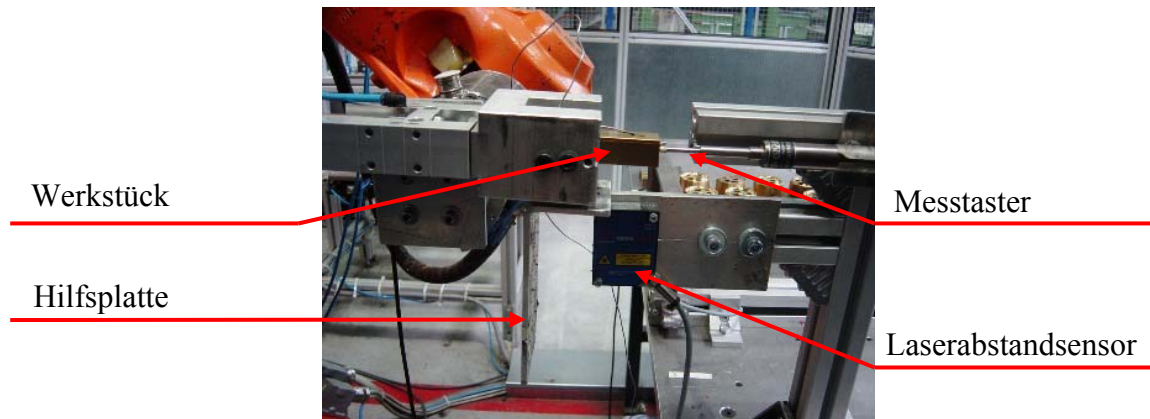


Abbildung 5.12: Abtragsmessung mit Hilfe eines Messtasters und eines Laserabstandsensors

Der Positionierungsfehler (PF) ergibt sich als Differenz der Messwerte des Laserabstandsensors vor (LS_v) und nach (LS_n) dem Schleifen:

$$PF = LS_v - LS_n \quad (5.2)$$

Der gesuchte lokale Abtrag wird durch die Korrektur des Messtasterwerts berechnet:

$$a_{lok} = a_{uk} - PF \quad (5.3)$$

Auf diese Art und Weise konnte der Einfluss des Wiederholgenauigkeitsfehlers des Roboters auf die gemessenen Abtragswerte in einem hohen Maße reduziert werden.

5.5. Andruckkraftschwankungen

Die während der Bearbeitung auftretenden Schleifkräfte verursachen Vibrationen im nicht ideal steifen Roboter-Halterung-Werkstück-Schleifmaschine-System. Die Schleifkräfte beeinflussen auch die Reibung in der Linearführung und in den Kolben des Luftdruckzylinders. Auf den eingestellten Wert der normalen Kraft haben die Schwankungen im Luftdrucknetz einen großen Einfluss. Deshalb müssen die Kräfte bei den Schleifversuchen überprüft werden. Die Werte für die integrale normale Kraft und tangentiale Kraft (Schnittkraft) werden bei den Schleifversuchen mit Hilfe des an der Roboterhand montierten Kraft-/Momentensensors (siehe Abschnitt 4.2.1) online aufgenommen. Die Abtastrate des Sensors beträgt 25 Hz und zur Überprüfung dient der mittlere Wert aller Messungen während der Schleifzeit. In dem Fall, dass der aufgenommene Wert der normalen Kraft wegen der Schwankungen im Luftdrucknetz nicht dem eingestellten Wert entspricht, wird der Einzelversuch wiederholt. Das Ergebnis einer Messung mit der eingestellten Normalkraft von 40 N und der von der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug abhängigen tangentialen Kraft wird in Abbildung 5.13 dargestellt. Die in Abbildung 5.13 sichtbaren Kraftschwankungen sind durch die Vibrationen des gesamten Systems während des Schleifens verursacht. Um die Schwankungen so klein wie möglich zu halten, wird der Ausfahrweg des Zylinders verkleinert, wodurch die Stabilität des Werk-

stück-Halterung-Zylinder-Systems erhöht wird. Um die Stoßwirkung zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug am Anfang jedes Einzelversuchs zu dämpfen, wird der Zylinder mit kleinerem Wert des Luftdrucks ausgefahren. Der Luftdruck wird erst nach vollem Eingriff auf den gewünschten Wert eingestellt.

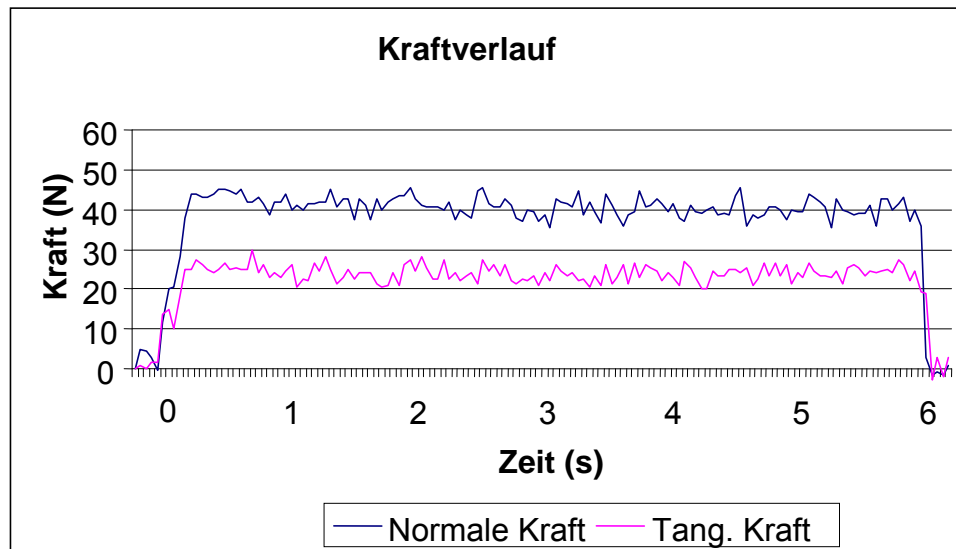


Abbildung 5.13: Kraftverlauf-Diagramm für einen Einzelversuch

5.6. Minimierung des Einflusses der Störgrößen

Durch die in den Abschnitten 5.2-5.5 beschriebenen Maßnahmen, wie z. B.

- Verwendung der verschleißfesten Schleifbänder und deren häufiger Austausch,
- sorgfältige Auswahl der Prozessparameter zur Minimierung des Wärmeeinflusses,
- regelmäßige Abkühlung des Werkstücks,
- Integration eines zusätzlichen Referenzmesssystems und
- Erhöhung der Steifigkeit der Werkstückhalterung

kann der Einfluss der Störgrößen auf die Prozessergebnisse minimiert werden. Dadurch entstehen für die Modellierung des Prozesses brauchbare Versuchsergebnisse. Die Genauigkeit des Prozessmodells soll nach der Modellierung durch zusätzliche Verifikationsversuche überprüft werden.

Kapitel 6

Modellierung lokaler Zusammenhänge mit Hilfe statistischer Versuchsplanung

Bisherige Untersuchungen [u. a. Ham98, Mey98, KK96] haben gezeigt, dass eine vollständige mathematische Beschreibung des Bandschleifprozesses nicht möglich ist, weil nicht alle wesentlichen Einflussfaktoren, z. B. Größe und Form jedes einzelnen Schleifkorns genau bestimmt werden können. Zusätzlich sind für Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, zu denen das Bandschleifen zählt, prozessbedingt nur statistische Ergebnisgrößen zu bestimmen. Daher können für das Bandschleifen nur Prozessmodelle entwickelt werden, die innerhalb bestimmter Grenzen der Prozessparameter die Ergebnisgrößen so genau wie nötig vorhersagen. Außerhalb im Prozess eingesetzter Wertebereiche werden keine Anforderungen an das Modell gestellt.

Der Abtrag an der Werkstückoberfläche als die wichtigste Ergebnisgröße beim Bandschleifen wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Die Einflussfaktoren können in drei Gruppen unterteilt werden:

1. Stellgrößen (Andruckkraft bzw. Zustellung, Schnittgeschwindigkeit...)
2. Werkzeugparameter (Radius, Bandkörnung, Elastizität des Belags...)
3. Werkstückparameter (Geometrie, Werkstoff...)

6.1. Statistische Versuchspläne für die Modellbildung

Das Ziel einer statistischen Versuchsplanung ist es u. a., die Beziehungen zwischen Zielgrößen und Einflussfaktoren eines Prozesses zu ermitteln [Kle01, Kro24, Pet91, WJG99]. Die Versuchsserie muss so durchgeführt werden, dass keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen den ausgewählten Einstellungsniveaus der Einflussgrößen vorliegen und dass der Einfluss der Störungen auf die Ergebnisse möglichst gering wird. Die richtige Auswahl eines statistischen Versuchsplans führt zu einem optimalen Verhältnis zwischen Versuchsaufwand und gewonnenen Informationen. Bei der Untersuchung der lokalen Zusammenhänge beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktrolle führt die Auswertung von statistischen Versuchsplänen zur Aufstellung eines Modells, das diese Zusammenhänge quantitativ beschreibt. Mit Hilfe der Versuchsplanung können auch die Wechselwirkungen erkannt werden, wie z. B. 2-Faktor-Interaktionen, so genannte Synergismen bzw. Antagonismen. Diese Effekte treten auf, wenn der Effekt zweier Faktoren zusammen größer bzw. kleiner ist als die Summe der Einzeleffekte der beiden Faktoren.

Um die Beziehungen zwischen Einflussfaktoren und Zielgröße ermitteln zu können, müssen die Versuchsbedingungen von Versuch zu Versuch variiert werden. Hierzu werden die Faktoren auf verschiedenen Stufen eingesetzt. Die Versuchsbedingungen werden für jeden Versuch durch die Faktorstufen festgelegt. Man unterscheidet zwischen quantitativen (messbaren, z. B. „Geschwindigkeit“) und qualitativen (nicht messbaren, z. B. „Werkstoff“) Faktoren. Entscheidend für die richtige Identifikation von wichtigen Einflussfaktoren ist die sinnvolle Festlegung ihrer Wertebereiche, d. h. die Festlegung der möglichen Werte der Faktoren für einen Versuchsplan. Tatsächlich sollten sowohl zu große als auch zu kleine Wertebereiche vermieden werden. Es ist wichtig ein Gebiet zu identifizieren, das für die Untersuchungen interessant ist, in dem die einfachen Modelle gültig sind und das trotzdem nicht zu klein ist, so dass man noch Veränderungen der Zielgröße beobachten kann. Ein solcher Wertebereich heißt auch „Region-of-interest“ [WJG99].

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Aufstellung eines Versuchsplans ist in Abbildung 6.1 dargestellt [Kle01, Kro24, Pet91, WJG99].

6.2. Aufstellung des Versuchsplans für die Modellierung der lokalen Zusammenhänge

Das Hauptziel der Untersuchung ist die Modellierung der lokalen Zusammenhänge beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktrolle. Die wichtigste Zielgröße dieses Modells ist das erzielte lokale Spanvolumen. Da der Prozess lokal zu betrachten ist, wird in diesem Fall das

Spanvolumen zu einem Punkt an der Oberfläche des Werkstücks reduziert. Deshalb wird die lokale Abtragshöhe an einem Punkt und nicht das gesamte Spanvolumen als die Zielgröße in das Modell eingesetzt. Um den Abtrag lokal zu betrachten, ist es erforderlich, eine gleichmäßige Abtragsverteilung bei der Versuchsdurchführung zu ermöglichen. Deshalb werden flächige Werkstücke benutzt, die vorgeschliffen werden müssen.

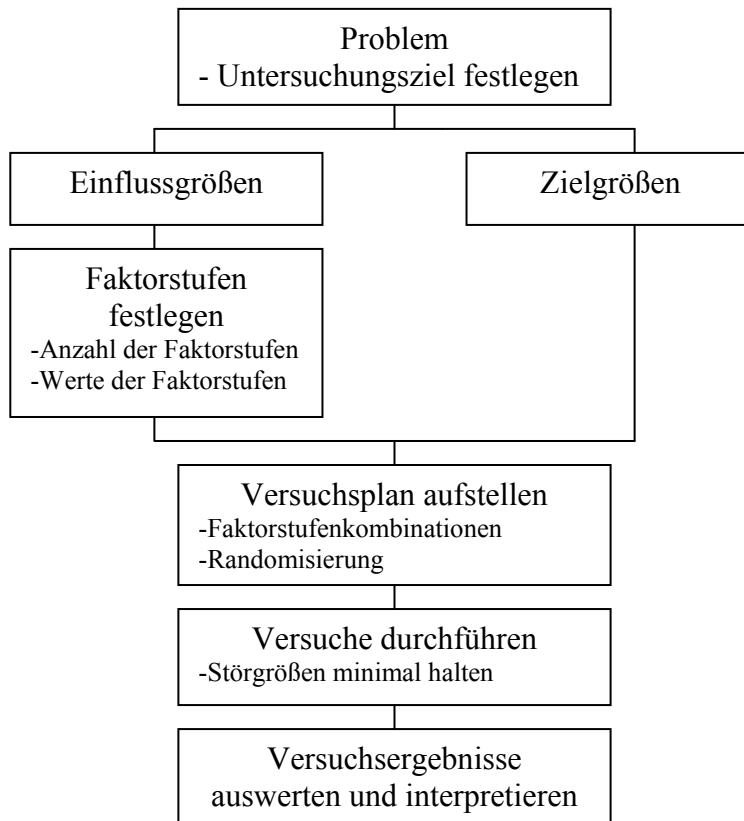


Abbildung 6.1: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Versuchsplanung

6.2.1. Festlegung der Einfluss- und Störgrößen

Als Ergebnis bisheriger Untersuchungen, u. a. [Ham98, KK96, Mey98, TH83] und eigener experimenteller Arbeiten hat sich die Liste aller Einflussgrößen auf die wichtigsten kontrolliert umsetzbaren Parameter eingeschränkt. Die ausgewählten Parameter für den Versuchsplan sind:

1. Schnittgeschwindigkeit (Geschwindigkeit des Bandes), v_s (m/s),
2. lokaler Andruck, q_{lok} (N/mm²),
3. Schleifzeit, t_s (s),
4. Körnung des Schleifbandes, k_{wz} (-),
5. Kontaktlänge, l_s (mm),
6. Radius des Werkzeugs, r_{wz} (mm),

7. Bandspannung, q_{wz} (N/mm²),
8. Werkstoff des Werkstücks, Mat (-).

Als die wichtigsten Störgrößen werden der Bandverschleiß und die während des Bearbeitungsprozesses entwickelte Wärme erkannt. Um den Einfluss des Bandverschleißes zu reduzieren, werden alle Bänder unter gleichen Bedingungen vorgeschliffen und nach jedem zweiten Einzelversuch ausgetauscht. Eine Minimierung des Wärmeeinflusses kann durch eine geeignete Auswahl von Schleifzeiten erfolgen. Die Schleifzeit für jeden einzelnen Versuch darf nicht zu lang sein, damit keine zu große Erwärmung des Werkstücks entsteht. Dadurch wird das Modell nicht eingeschränkt, weil es in der Praxis versucht wird, extreme Erwärmung des Werkstücks durch eine geeignete Prozessführung zu vermeiden. Andere unvermeidliche Störgrößen sind die Fehler beim Abtragmessen, sowie die Kontaktkraftschwankungen. Deren Einfluss wird möglichst klein gehalten und bei der statistischen Analyse als Modellfehler miteingefasst.

6.2.2. Wertebereiche für die Einflussgrößen

Im nächsten Schritt sind die Wertebereiche für die Einflussfaktoren zu bestimmen. Für die Versuche werden flächige Werkstücke mit der Breite $B=20$ mm ausgewählt. Um möglichst viele Kontaktsituationen darstellen zu können, wird die Kontaktlänge im Bereich von 10 bis zu 25 mm variiert, was einer Variation der Kontaktfläche von 200 bis 500 mm² entspricht.

Mit Hilfe von Vorversuchen und den praktischen Erfahrungen konnten die Grenzen des Wertebereichs für den Andruck auf 0,08 und 0,2 N/mm² (0,8-2 bar) festgelegt werden. Mittels eines Kraft-/Momentensensors kann die Andruckkraft während der Einzelversuche überprüft werden. Die Schleifzeit t_s darf weder zu lang noch zu kurz sein. Eine zu lange Schleifzeit führt zu einer erhöhten Erwärmung des Werkstücks, was ein ungewünschter Störeffekt ist. Bei einer zu kurzen Schleifzeit wird der Abtrag zu klein und kann nicht mit einer ausreichenden Genauigkeit gemessen werden. Deshalb wird die Schleifzeit zwischen 3 und 6 s variiert.

Nach der Praxiserfahrung liegen empfohlene Werte für die Bandgeschwindigkeit zwischen 20 und 30 m/s und damit ist der Wertebereich für diese Einflussgröße bestimmt sowie die Wertebereiche für den Radius der Kontaktscheibe (163-200 mm), Körnung des Schleifbandes (P100-P280) und Bandspannung (0,3-0,5 N/mm² oder 3-5 bar).

Der Werkstoff des Werkstücks ist eine qualitative Eingangsgröße. Für die Versuche werden Baustahl St37 und Messing, als sehr oft für Sanitärarmaturen verwendeter Werkstoff ausgewählt. Durch die Nutzung des in diesem Kapitel beschriebenen Verfahrens können dann die gesuchten Abhängigkeiten leicht für alle anderen Werkstoffe modelliert werden.

Die Niveaus für alle 7 quantitativen Einflussgrößen sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

	$v_s (x_1)$ (m/s)	$q_{lok} (x_2)$ (N/mm ²)	$t_s (x_3)$ (s)	$k_{wz} (x_4)$ (-)	$l_s (x_5)$ (mm)	$r_{wz} (x_6)$ (mm)	$q_{wz} (x_7)$ (N/mm ²)
„ -1 „	20	0,08	3	P 100	10	163	0,3
„ +1 „	30	0,2	6	P 280	25	200	0,5

Tabelle 6.1: Die Niveaus für die quantitativen Einflussgrößen

Die Versuchspläne mit zwei Niveaus für jede einzelne Einflussgröße werden normalerweise bei der Untersuchung eines Prozesses verwendet, wobei eine lineare Abhängigkeit vorausgesetzt wird. Um die Übersichtlichkeit des Versuchsplans zu erhöhen und die Berechnung zu erleichtern, werden die Faktoren kodiert und die echten Niveaus mit -1/+1 ersetzt. Die Berechnung erfolgt dann für kodierte Faktoren. Der kodierte Faktor X_{Cj} ist definiert durch [WJG99]:

$$X_{Cj} = \frac{(X_j - m_j)}{d_j}, \quad (6.1)$$

wobei m_j die Mitte und d_j die Halbspanne des Wertebereichs von X_j sind. Wenn die obere und untere Grenze des Wertebereichs von X_j mit X_{jo} und X_{ju} bezeichnet werden, dann sind Mitte und Halbspanne gegeben durch:

$$m_j = \frac{(X_{jo} + X_{ju})}{2} \quad \text{und} \quad d_j = \frac{(X_{jo} - X_{ju})}{2}. \quad (6.2)$$

Also ist der Wertebereich von X_j : $X_j \in [m_j - d_j, m_j + d_j]$, und das ist äquivalent zu $X_{Cj} \in [-1, +1]$. Die Kodierung gilt nur für quantitative Einflussgrößen. Qualitative Einflussgrößen (z. B. Werkstoff des Werkstücks) werden nicht kodiert.

6.2.3. Screening-Plan

Es ist oft der Fall, dass nur wenige Faktoren die Zielgröße tatsächlich beeinflussen. Deshalb ist es sinnvoll, durch die Screening-Pläne die wichtigsten Faktoren für eine Zielgröße mit der minimal möglichen Anzahl von Versuchen zu identifizieren. Dabei werden lineare Modelle in den kodierten Faktoren gebildet.

Screening-Modell für die Zielgröße Y im i -ten Versuch (Y_i) in Abhängigkeit von K kodierten Einflussfaktoren ($X_{C1}, X_{C2}, X_{C3}, \dots, X_{CK}$) ist eine funktionale Beziehung definiert durch [WJG99]:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^K X_{Cij} \beta_j + \varepsilon_i, \quad (6.3)$$

wobei die Koeffizienten $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K$ zu bestimmen sind und

$$\varepsilon_i \sim u.i.N(0, \sigma^2)$$

ein stochastischer Fehlerterm (Rauschen) ist.

Die Bezeichnung „ $\sim u.i.N(0, \sigma^2)$ “ bedeutet, dass der Fehlerterm “unabhängig identisch normalverteilt” mit dem Erwartungswert 0 und mit konstanter Varianz σ^2 für alle Beobachtungen ist, d. h. der Wert des Fehlerterms hängt nicht von vorhergehenden (oder zukünftigen) Werten der Zielgröße oder der Einflussfaktoren ab und die Verteilung des Fehlerterms ist identisch für alle Beobachtungen. Die stochastische Modellkomponente ε_i deutet an, dass das Modell nur eine Näherung an die Wirklichkeit ist.

Die unbekanntes Koeffizienten β_j werden mit Hilfe von sog. Schätzverfahren näherungsweise bestimmt. Das bekannteste Beispiel für ein solches Verfahren ist die Regressionsanalyse. Mit Hilfe der Regressionsanalyse wird ein mathematisches Modell für den Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Zielgröße an vorhandene Daten angepasst. Wird die Abhängigkeit einer Zielgröße von mehreren Einflussgrößen beschrieben, so spricht man von mehrfacher Regression. Hier ist die Gleichung der Ebene mit der Ordnung K gesucht, sodass die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den an dieser Ebene liegenden Werten des gesuchten mathematischen Modells und den von Versuchen stammenden Messwerten so klein wie möglich ist. So werden z. B. die Daten für ein eindimensionales Problem an eine Gerade angepasst.

Versuchs nr.	X_{C1}	X_{C2}	X_{C3}	X_{C4}	X_{C5}	X_{C6}	X_{C7}	X_{C8}	X_{C9V}	X_{C10V}	X_{C11V}
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
3	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
4	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
5	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
6	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
7	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
9	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
10	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
11	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
12	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1

Tabelle 6.2: Plackett-Burman-Plan mit 11 Faktoren und 12 Versuchen

Plackett-Burman-Pläne sind Screening-Pläne, bei denen die Anzahl der Faktoren K um 1 geringer als die Anzahl der Versuche n ist, d. h. $K=n-1$. Bei Plackett-Burman-Plänen sind sämtliche Faktoren unkorreliert, d. h. das Vorliegen eines bestimmten Effekts beeinflusst die Schätzung eines beliebigen anderen Effekts nicht. Leider liegen Plackett-Burman-Pläne nur mit Versuchsanzahlen n vor, die ein Vielfaches von 4 sind. Da in unserem Versuchsplan 8 Einflussgrößen vorhanden sind, müssen noch 3 virtuelle Größen hinzugefügt werden, um einen Plan mit insgesamt 11 Faktoren und 12 Versuchen zu erhalten. Ein solcher Plackett-Burman-Plan ist in der Tabelle 6.2 dargestellt.

6.2.4. Modellierungsplan

Nachdem die wichtigen Einflussgrößen mit Hilfe eines Screening-Plans identifiziert wurden, ist ein Modellierungsplan, der nur diese Einflussgrößen betrachtet, zu erstellen. Außerdem wird in dieser Phase untersucht, ob die Zielgröße nicht nur von den Einflussfaktoren, sondern auch von deren Interaktionen abhängt.

Ein lineares statistisches Modell für eine Zielgröße in Abhängigkeit von kodierten Einflussfaktoren und deren Interaktionen hat die Form:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^K X_{Cij} \beta_j + \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{k>j} x_{Cij} X_{Cik} \beta_{j,k} + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim u.i.N(0, \sigma^2), \quad (6.4)$$

wobei β_0 der Achsenabschnitt, β_j der Effekt des j -ten Faktors und $\beta_{j,k}$ der Effekt der Interaktion zwischen Faktor j und Faktor k ist. Alle unbekanntenen Koeffizienten β werden hier, ähnlich wie in der Screening-Phase, mit Hilfe der Regressionanalyse bestimmt. Falls die Interaktion zwischen Faktor j und k vernachlässigt werden kann, wird $\beta_{j,k}=0$ gesetzt.

Die faktoriellen Versuchspläne mit zwei Niveaus für jede einzelne Einflussgröße werden normalerweise als Modellierungspläne verwendet. In unserem Fall wird ein vollfaktorieller Versuchsplan mit 2^K Versuchen für K wichtige Einflussgrößen benutzt, mit dem man nicht nur sämtliche Faktoreffekte unabhängig voneinander schätzen kann, sondern auch sämtliche 2-Faktor-Interaktionen. Tabelle 6.3 zeigt den vollfaktoriellen Versuchsplan mit K Faktoren.

6.3. Versuchsaufbau

Die Versuchsanlage besteht aus:

- einem ABB4400 Roboter mit einer Handhabungskapazität von bis zu 45 kg,
- einer Bandschleifmaschine MSM 3R von der Fa. carat robotic innovation GmbH,
- einem Messtaster mit einem Messbereich von 10 mm und einer Auflösung von 0,01 mm,

6. Modellierung lokaler Zusammenhänge mit Hilfe statistischer Versuchsplanung

- einem Laserabstandssensor mit einem Messbereich von 20 mm und einer Auflösung von 0,002 mm,
- einem 6-Achsen Kraft-/Momentensensor, Typ FTS von der Fa. SCHUNK GmbH & Co. KG (siehe Abschnitt 4.1).

Vers.Nr	Einflussgrößen							Erg.
	X_{C1}	X_{C2}	X_{C3}		X_{CK}	$X_{C1}X_{C2}$	$X_{C1}X_{C3}$	
1	-1	-1	-1		-1	+1	+1	
2	+1	-1	-1		-1	-1	-1	
3	-1	+1	-1		-1	-1	+1	
4	+1	+1	-1		-1	+1	-1	
5	-1	-1	+1		-1	+1	-1	
6	+1	-1	+1	...	-1	-1	+1	
7	-1	+1	+1		-1	-1	-1	
8	+1	+1	+1		-1	+1	+1	
9	-1	-1	-1		-1	+1	+1	
10	+1	-1	-1		-1	-1	-1	
11	-1	+1	-1		-1	-1	+1	
...								
2^K	+1	+1	+1		+1	+1	+1	

Tabelle 6.3: Vollfaktorieller Versuchsplan mit K Einflussgrößen

Der Roboter führt das Werkstück und drückt es gegen die elastische Kontaktrolle der Bandschleifmaschine. Zwischen dem Roboterarm und der Werkstückhalterung ist der Kraft-Momentensensor montiert, mit dem die gesamte (integrale) Andruckkraft in der Zustellungsrichtung gemessen und überprüft werden kann.

Die wichtigsten Bestandteile der Schleifmaschine MSM 3R sind drei Kontaktscheiben (siehe Abbildung 6.2), von denen zwei (untere Kontaktscheibe 1 und 2) durch Drehstrom-Asynchron-Motoren angetrieben werden. Die Motoren haben eine Nennleistung von 4 kW und ihre Drehzahl beträgt 1450 min^{-1} bei einer Frequenz von 50 Hz. Mit Hilfe eines Frequenzumrichters kann die Motordrehzahl und damit auch die Bandgeschwindigkeit stufenlos geregelt werden. Die mit nicht geöltem Luftdruck besorgten Zylinder ermöglichen die Regelung der normalen Andruckkraft und der Bandspannung an den Kontaktscheiben. Die Andruckkraft und die Bandspannung können dann über ein servopneumatisches Proportionalventil stu-

fenlos vorgewählt werden. Der maximal zulässige Betriebsdruck beträgt 8 bar oder $0,8 \text{ N/mm}^2$.

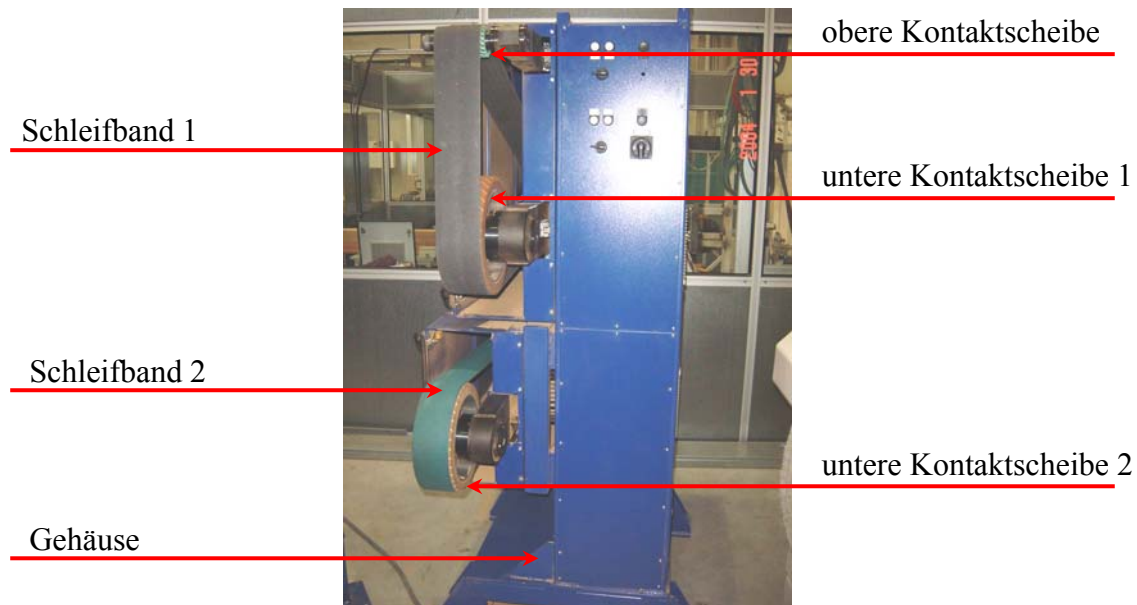


Abbildung 6.2: Bandschleifmaschine MSM 3R von der Fa. carat robotic innovation GmbH

Da der Zylinder für die Regelung der normalen Andruckkraft an der Schleifmaschine im Vergleich zu den gewählten Werkstücken relativ groß ist und wegen seiner großen Trägheit eine effiziente Andruckkraftregelung erschwert, wird zur Aufbringung der normalen Kraft ein kleinerer Zylinder an der Roboterseite (vgl. Abschnitt 4.1) montiert. Die gewünschte Andruckkraft wird durch ein Druckregelventil mit Manometer eingestellt.

Der Abtrag wird mit Hilfe eines Messtasters ermittelt, indem der Roboter das Werkstück an derselben Position vor und nach dem Schleifen führt. Um den durch die Positionierungsungenauigkeit des Roboters verursachten Fehler zu reduzieren, werden zusätzlich ein Laserabstandsensor und eine an der Werkstückhalterung angebrachte Platte als Referenzmessobjekt oder Bezugspunkt (siehe Abschnitt 5.4) eingesetzt.

6.4. Durchführung der Versuchsserie

Insgesamt 12 Versuche für 8 Einflussgrößen und 3 virtuelle Größen werden in der Screening-Phase durchgeführt. Nach der Elimination der nicht signifikanten Parameter sind noch 2^K Versuche in der Modellierungsphase durchzuführen, wobei K die Anzahl aller signifikanten Parameter ist. Um zu verhindern, dass ein Trend oder eine andere unerkannte Änderung der Ergebnisse die Schätzung der Effekte der Faktoren verfälscht, werden die Einzelversuche in zufälliger Reihenfolge durchgeführt, d. h. randomisiert.

Für jeden Einzelversuch wird die normale integrale Kraft mit Hilfe eines Druckregelventils eingestellt. Die Stellwerte ergeben sich durch Multiplikation des gewünschten lokalen An- drucks mit der Kontaktfläche, die ein Produkt der Kontaktlänge und Kontaktbreite ist:

$$F_A = a_{lok} \cdot A_s = a_{lok} \cdot l_s \cdot B \quad (6.5)$$

Die tatsächliche Kontaktlänge ist wegen des Verschleißs die Länge des Kreisbogens mit dem Durchmesser d_{wz} , wobei die Länge der Sehne des Kreisbogens der Werkstücklänge l_{ws} entspricht (siehe Abbildung 6.4).

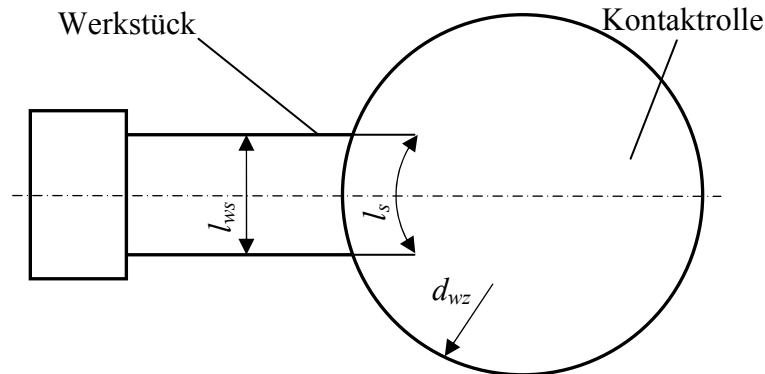


Abbildung 6.4: Länge des Werkstücks und Kontaktlänge

Da $d_{wz} \gg l_{ws}$ ist, kann in diesem Fall die Kontaktlänge l_s mit der Werkstücklänge l_{ws} approximiert werden, d. h.

$$l_s \sim l_{ws} \quad (6.6)$$

Die normale und tangentielle Kraft werden mit Hilfe des Messtasters während jedes Einzelversuchs online gemessen. Wenn der gemessene Wert für die normale Kraft stark vom Einstellungswert abweicht, wird der Schleifversuch wiederholt.

Die mittleren Werte der normalen Kraft und der tangentialen Kraft (Schnittkraft) werden auch für die Berechnung des Reibungskoeffizienten μ benutzt. Die Messergebnisse haben gezeigt dass dieser Koeffizient für die betrachteten Schleifbänder nur vom Werkstoff des Werkstücks abhängig ist. Dieser beträgt $\mu \sim 0,75$ für Baustahl $\mu \sim 0,5$ für Messing.

Der Abtrag wird nach jedem einzelnen Versuch mit Hilfe des Messtasters und des Laserabstandsensors gemessen. Um die regelmäßige Abtragsverteilung zu überprüfen und die Genauigkeit der Messung zu erhöhen, ist der Abtrag an drei verschiedenen Stellen an der Werkstückoberfläche zu messen. Der Abtragswert ergibt sich dann als Mittelwert dieser drei Messungen.

6.5. Auswertung der Versuchsergebnisse

Nach der Durchführung aller Versuche in der Screening- und Modellierungsphase werden die Ergebnisse ausgewertet. Durch die Auswertung ergeben sich die Effekte der einzelnen Faktoren und der Faktorinteraktionen, die die unbekannt Koeffizienten β für die lineare Gleichungen (6.3) und (6.4) bestimmen.

Jedoch haben bisherige Untersuchungen [KK96, Sch03] gezeigt, dass die Faktoren nicht immer einen linearen Einfluss auf den Abtrag als Zielgröße aufweisen. Im Allgemeinen können die Zusammenhänge durch Potentialfunktionen beschrieben werden. Deshalb werden die Werte für die Einflussgrößen bei der Versuchsplanung zuerst transformiert und durch ihre logarithmischen Werte ersetzt:

$$Y_i = \ln y_i ; X_j = \ln x_j \quad (6.7)$$

Die linearen Zusammenhänge (Gleichung 6.4) gelten dann für die logarithmischen Werte und durch die Substitution (6.7) in die Gleichung (6.4) ergibt sich:

$$\hat{y} = C \cdot x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot x_K^{\beta_K} \cdot e^{\beta_{12} \ln x_1 \ln x_2} \cdot e^{\beta_{13} \ln x_1 \ln x_3} \cdot \dots \quad (6.8)$$

wobei K die Anzahl der signifikanten Faktoren aus der Screening-Phase ist. Auf diese Art und Weise kann ein Zusammenhang ermittelt werden, der in seiner Form den theoretisch festgestellten Zusammenhängen [Ham98, Mey98, Sch03] entspricht, und diese um die Faktor-Interaktionen erweitert.

Die Gleichung (6.8) beschreibt die lokalen Zusammenhänge beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktrolle für den ausgewählten Wertebereich der Einflussgrößen. Eine statistische Auswertung ergibt auch die möglichen Abweichungen der Messwerte von den mit der Gleichung (6.8) berechneten Werte für einen gegebenen Wahrscheinlichkeitswert.

6.5.1. Auswertung des Screening-Plans

Die Ergebnisse der Screening-Versuche sind in Tabelle 6.4 gegeben. Die gemessenen Werte des Abtrags befinden sich überwiegend im Bereich 0,1-1 mm, was den Ergebnissen bei den realen Schleifprozessen entspricht. Der mittlere Wert des Abtrags \bar{y} , der aus den Messungen an drei verschiedenen Stellen des Werkstücks stammt, muss zunächst nach Gleichung (6.7) transformiert werden, d. h. für die Regression werden logarithmische Werte des Abtrags benutzt. Diese Werte sind in Tabelle 6.5 gegeben.

Versuch Nr.	v_s (x_1) (m/s)	q_{lok} (x_2) (N/mm ²)	t_s (x_3) (s)	k_{wz} (x_4) (-)	l_s (x_5) (mm)	r_{wz} (x_6) (mm)	q_{wz} (x_7) (N/mm ²)	Mat (x_8) (-)	a_{lok} (y) (mm)		
									Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3
1	30	0,2	6	P 280	25	200	0,5	St37	0,639	0,642	0,651
2	20	0,2	3	P 280	25	200	0,3	Messing	0,290	0,293	0,302
3	20	0,08	6	P 100	25	200	0,5	Messing	0,849	0,880	0,877
4	30	0,08	3	P 280	10	200	0,5	St37	0,099	0,102	0,109
5	20	0,2	3	P 100	25	162	0,5	St37	0,438	0,484	0,473
6	20	0,08	6	P 100	10	200	0,3	St37	0,192	0,198	0,190
7	20	0,08	3	P 280	10	162	0,5	Messing	0,083	0,095	0,100
8	30	0,08	3	P 100	25	162	0,3	St37	0,182	0,174	0,178
9	30	0,2	3	P 100	10	200	0,3	Messing	1,798	1,801	1,810
10	30	0,2	6	P 100	10	162	0,5	Messing	3,594	3,532	3,602
11	20	0,2	6	P 280	-1	162	0,3	St37	0,380	0,424	0,417
12	30	0,08	6	P 280	25	162	0,3	Messing	0,275	0,304	0,309

Tabelle 6.4: Ergebnisse des Screening-Plans

6. Modellierung lokaler Zusammenhänge mit Hilfe statistischer Versuchsplanung

Versuch Nr.	$a_{lok}(y)$ (mm)				$Y_i = \ln \bar{y}_i$
	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	\bar{y}_i	
1	0,639	0,642	0,651	0,644	-0,44006
2	0,290	0,293	0,302	0,295	-1,22121
3	0,849	0,880	0,877	0,869	-0,14080
4	0,099	0,102	0,109	0,103	-2,26980
5	0,438	0,484	0,473	0,465	-0,76572
6	0,192	0,198	0,190	0,193	-1,64334
7	0,083	0,095	0,100	0,093	-2,37875
8	0,182	0,174	0,178	0,178	-1,72597
9	1,798	1,801	1,810	1,803	0,58945
10	3,594	3,532	3,602	3,576	1,27429
11	0,380	0,424	0,417	0,407	-0,89894
12	0,275	0,304	0,309	0,296	-1,21740

Tabelle 6.5: Logarithmische Werte des Abtrags

Auch die Werte für die Faktoren x_j müssen zunächst nach Gleichung (6.7) transformiert und danach mit Hilfe der Gleichungen (6.1) und (6.2) noch zusätzlich kodiert werden. Die kodierten und transformierten Werte sind in Tabelle 6.6 gegeben.

	$v_s(x_1)$ (m/s)	$q_{lok}(x_2)$ (N/mm ²)	$t_s(x_3)$ (s)	$k_{wz}(x_4)$ (-)	$l_s(x_5)$ (mm)	$r_{wz}(x_6)$ (mm)	$q_{wz}(x_7)$ (N/mm ²)
unteres Niveau x_{ju}	20	0,08	3	P 100	10	163	0,3
oberes Niveau x_{jo}	30	0,2	6	P 280	25	200	0,5
transformiert X_{ju}	2,99573	-2,52572	1,09861	4,60517	2,30259	5,09375	-1,20397
transformiert X_{jo}	3,40120	-1,60943	1,79175	5,63479	3,21887	5,29832	-0,69315
Mitte m_j	3,19846	-2,06758	1,44518	5,11998	2,76073	5,19603	-0,94856
Halbspanne d_j	0,20273	0,45814	0,34657	0,51481	0,45814	0,10228	0,25541
kodiert X_{Cju}	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
kodiert X_{Cjo}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Tabelle 6.6: Transformation und Kodierung der Faktoren

Die Kodierungsgleichungen für alle 7 quantitativen Faktoren haben die Form (siehe Gleichung (6.1) und Tabelle 6.6):

$$\begin{aligned}
 X_{C1} &= \frac{(X_1 - 3,19846)}{0,20273}; & X_{C2} &= \frac{(X_2 + 2,06758)}{0,45814}; & X_{C3} &= \frac{(X_3 - 1,44518)}{0,34657}; \\
 X_{C4} &= \frac{(X_4 - 5,11998)}{0,51481}; & X_{C5} &= \frac{(X_5 - 2,76073)}{0,45814}; & & \\
 X_{C6} &= \frac{(X_6 - 5,19603)}{0,10228}; & X_{C7} &= \frac{(X_7 + 0,94856)}{0,25541}; & &
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Die geschätzten Werte $\hat{\beta}_j$ für die Koeffizienten β_j werden mit Hilfe von linearer Regression oder der Methode der kleinsten Quadrate berechnet, so dass die Fehlerquadratsumme aller Einzelversuche im Bezug auf das erhaltene mathematische Modell minimal wird. Es gilt dabei:

$$\begin{aligned}
 \hat{\beta}_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i; & \text{Achsenabschnitt} \\
 \hat{\beta}_j &= \frac{1}{N} \left(\sum_{i \text{ mit } X_{Cj}=+1} Y_i - \sum_{i \text{ mit } X_{Cj}=-1} Y_i \right)
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

N ist die Anzahl der durchgeführten Versuche. So erhält man, z. B. für $\hat{\beta}_1$, den Wert (siehe Tabellen 6.2 und 6.5):

$$\begin{aligned}
 \hat{\beta}_1 &= \frac{1}{12} [(Y_1 + Y_4 + Y_8 + Y_9 + Y_{10} + Y_{12}) - (Y_2 + Y_3 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_{11})] = \\
 &= \frac{1}{12} (-0,44006 - 2,26980 - 1,72597 + 0,58945 + 1,27429 - 1,21740) - \\
 &\quad - \frac{1}{12} (-1,22121 - 0,14080 - 0,76572 - 1,64334 - 2,37875 - 0,89894) = \\
 &= 0,27161
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

Für die Berechnung anderer Koeffizienten wird die Regression-Analyse-Funktion von MS Excel benutzt.

Das Ziel der Screening-Phase ist es, nicht signifikante Faktoren aus dem Model auszuschließen. Dafür wird hier nach Weihs et al. [WJG99] eine schrittweise Regression mit Vorwärtsauswahl durchgeführt. Im ersten Schritt wird zuerst derjenige Faktor mit dem größten Effekt ausgewählt und für diesen die Regression durchgeführt. Dann wird der Faktor mit dem zweitgrößten Effekt in die Regression integriert usw., bis das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} nicht mehr signifikant steigt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 und das adjustierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} sind die Größen, die die Anpassung des Modells an die Versuchsergebnisse beschreiben. Der maximale Wert 1 nimmt die Anpassungsgüte für ein ideales Modell an.

In Tabelle 6.7 sind die mit Hilfe der Regression-Analyse-Funktion berechneten Werte der Koeffizienten $\hat{\beta}_j$ in absteigender Reihenfolge ihrer Absolutwerte dargestellt.

6. Modellierung lokaler Zusammenhänge mit Hilfe statistischer Versuchsplanung

$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_8$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_7$	$\hat{\beta}_6$	$\hat{\beta}_5$
-0,90319	0,65949	-0,50117	0,39215	-0,38745	0,27161	0,08638	0,04889	-0,01534

Tabelle 6.7: Regressionskoeffizienten für 8 Faktoren in absteigender Reihenfolge

Tabelle 6.7 zeigt, dass der Faktor „lokaler Andruck“ (x_2) den größten Effekt auf den Abtrag als Zielgröße hat. Dieser Faktor wird neben dem Freikoeffizient (Schnittpunkt $\hat{\beta}_0$) als erster für die schrittweise Regression eingesetzt. Danach folgen „Körnung des Schleifbandes“ (x_4), „Schleifzeit“ (x_3), „Werkstoff des Werkstücks“ (x_8) usw. In Tabelle 6.8 sind die mit Hilfe der Regression-Analyse-Funktion berechneten Anpassungsgüten R^2 und R^2_{adj} der schrittweisen Regression mit Vorwärtsauswahl gegeben.

eingeschlossener Faktor		R^2	R^2_{adj}
lokaler Andruck (x_2)	q_{lok}	0,394	0,333
Körnung des Schleifbandes (x_4)	k_{wz}	0,621	0,537
Schleifzeit (x_3)	t_s	0,760	0,670
Werkstoff des Werkstücks (x_8)	Mat	0,896	0,837
Bandgeschwindigkeit (x_1)	v_s	0,963	0,932
Bandspannung (x_7)	r_{wz}	0,970	0,939

Tabelle 6.8: Anpassungsgüten der schrittweisen Regression in der Screening-Phase

Nachdem der fünfte Faktor („Bandgeschwindigkeit“) in die Regression eingeschlossen wurde, steigt das adjustierte Bestimmtheitsmaß auf 0,932 (siehe Tabelle 6.8). Dieser Wert ändert sich nicht signifikant nach der Integration des sechsten Faktors („Bandspannung“) und dadurch ergibt sich, dass nur die ersten fünf Faktoren einen signifikanten Einfluss auf den Abtrag haben. Die Einflussgrößen:

- Kontaktlänge l_s ,
- Radius des Werkzeugs r_{wz} und
- Bandspannung q_{wz}

haben sich als nicht signifikante Faktoren erwiesen und werden nicht in das Modell eingeschlossen.

Das Ergebnis der Regression-Analyse-Funktion von MS Excel für den Screening-Plan mit 8 Faktoren ist in Tabelle 6.9 gegeben.

AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG

<i>Regressions-Statistik</i>	
Multipler Korrelationskoeffizient	0,988832907
Bestimmtheitsmaß	0,977790519
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,948565235
Standardfehler	0,313238497
Beobachtungen	12

ANOVA			
	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>
Regression	8	12,95922171	1,619902713
Residue	3	0,294355068	0,098118356
Gesamt	11	13,25357677	

	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Untere 95%</i>	<i>Obere 95%</i>
Schnittpunkt	-0,903186322	0,090424165	-1,190956372	-0,6154163
X1	0,271606396	0,090424165	-0,016163655	0,55937645
X2	0,65948777	0,090424165	0,37171772	0,94725782
X3	0,39214601	0,090424165	0,10437596	0,67991606
X4	-0,501172146	0,090424165	-0,788942197	-0,2134021
X5	-0,015339078	0,090424165	-0,303109129	0,27243097
X6	0,048894694	0,090424165	-0,238875356	0,33666475
X7	0,086382308	0,090424165	-0,171387743	0,40415236
X8	-0,387450842	0,090424165	-0,675220893	-0,0996808

Tabelle 6.9: Ergebnis der Regression-Analyse-Funktion von MS Excel für den Screening-Plan

6. Modellierung lokaler Zusammenhänge mit Hilfe statistischer Versuchsplanung

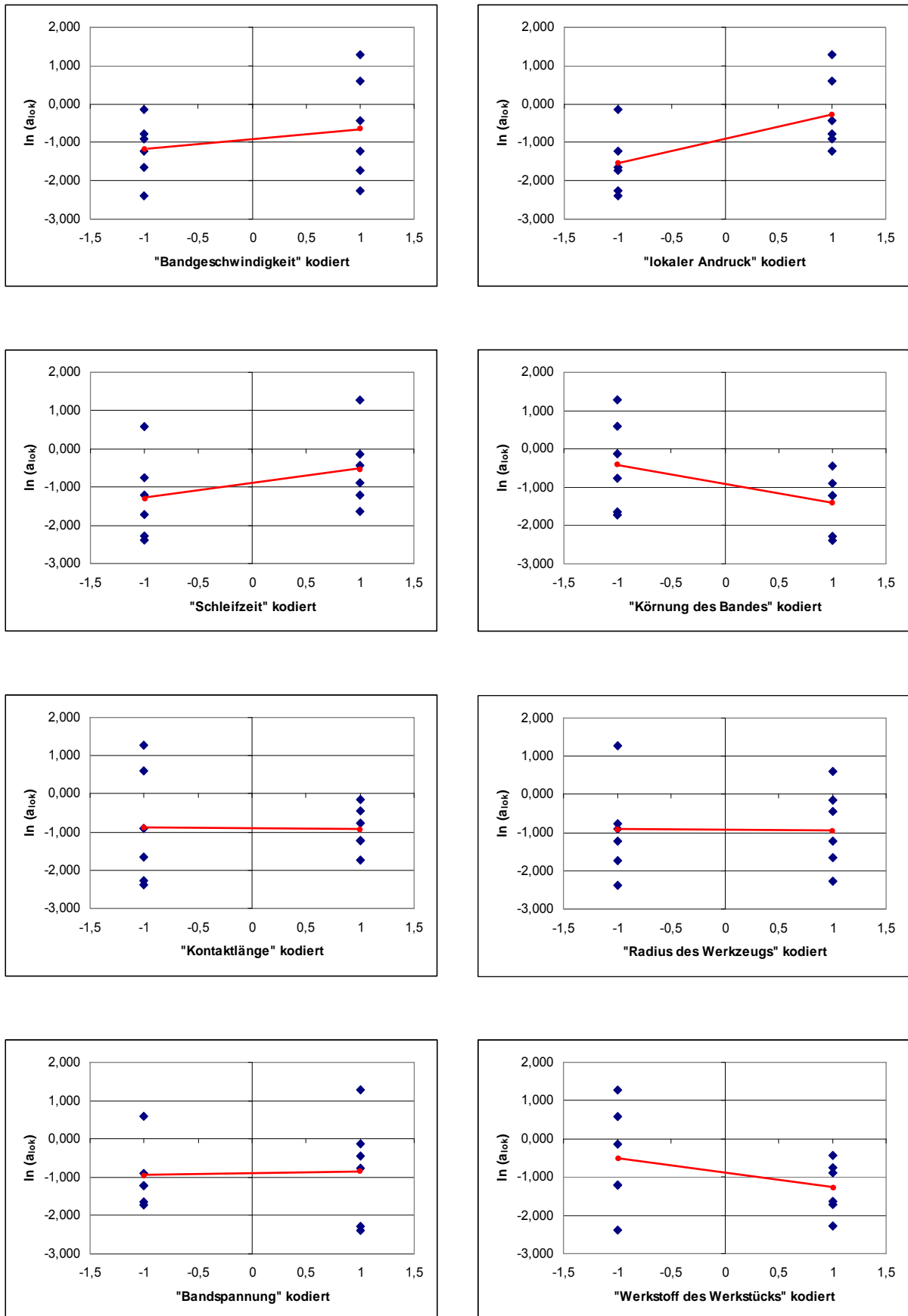


Abbildung 6.5: Effekte der kodierten Prozessparameter in der Screening-Phase

Neben den geschätzten Werten für die Koeffizienten $\hat{\beta}$ ergibt die Funktion auch wichtige statistische Kenngrößen, wie z. B. den Korrelationskoeffizienten, das Bestimmtheitsmaß (R^2), das adjustierte Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}), den Standardfehler, die Quadratsummen (SS und MS) des Regressionsmodells und die Grenzen des Konfidenzniveaus von 95% für die geschätzten Koeffizienten. Abbildung 6.5 veranschaulicht die Effekte der kodierten Prozessparameter auf den logarithmischen Werten des Abtrags. Je größer die Steigerung der Linie, die die Mittelwerte der Messungen auf zwei Niveaus verbindet, desto größer ist der Effekt des betrachteten Parameters. Die resultierende Regressionsnäherung der kodierten signifikanten Faktoren führt zum folgenden Screening-Modell:

$$\hat{Y} = -0,9139 + 0,27161 \cdot X_1 + 0,65949 \cdot X_2 + 0,39215 \cdot X_3 - 0,50117 \cdot X_4 - 0,38745 \cdot X_8 \quad (6.12)$$

Eine Dekodierung des Modells erfolgt erst in der Modellierungsphase, wobei auch 2-Faktor-Interaktionen zu betrachten sind.

6.5.2. Auswertung des Modellierungsplans

Im zweiten Schritt wird ein Modellierungsplan erstellt, der zusätzlich untersucht, ob die Zielgröße nicht nur von den Einflussfaktoren, sondern auch von deren Interaktionen abhängt. Da der „Werkstoff des Werkstücks“ eine qualitative Größe ist, deren Einfluss nicht eindeutig quantifiziert werden kann, werden für Baustahl St37 und Messing zwei separate vollfaktoriel- le Versuchsserien mit je $2^4 = 16$ Versuchen (4 Eingangsgrößen, 2 Stufen für jede Eingangsgröße) geplant. Die Eingangsgrößen und Interaktionen ohne signifikanten Einfluss werden ähnlich wie in der Screening-Phase durch eine schrittweise Regression mit Vorwärtsauswahl eliminiert.

6.5.2.1 Auswertung des Modellierungsplans für Baustahl St37

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsserien mit Baustahl St37 als Werkstoff des Werkstücks sowie die logarithmischen Werte des gemessenen Abtrags werden in Tabelle 6.10 dargestellt.

Die durchgeführte Regressionsanalyse (siehe Tabelle 6.11) hat gezeigt, dass neben den 4 Hauptfaktoren auch die Interaktion zwischen den Größen „lokaler Abtrag“ und „Körnung des Bandes“ den gemessenen Abtrag signifikant beeinflusst. Alle anderen Interaktionen haben sich als nicht signifikant für die Zielgröße erwiesen. Nach der Dekodierung nach Gleichung (6.9) und der Rücktransformation nach Gleichung (6.7) erhält das gesuchte statistische Modell für die lokalen Zusammenhänge beim Bandschleifen von Baustahl St37 folgende Form:

$$a_{lok} = 80,6 \cdot t_s \cdot v_s^{1,05} \cdot q_{lok}^{3,77} \cdot k_{wz}^{-1,45} \cdot e^{-0,45 \cdot \ln q_{lok} \cdot \ln k_{wz}} \quad (\text{mm}) \quad (6.13)$$

Vers. Nr.	v_s (x_1) (m/s)	q_{lok} (x_2) (N/mm ²)	t_s (x_3) (s)	k_{wz} (x_4) (-)	$a_{lok}(y)$ (mm)				
					Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	\bar{y}_i	$\ln \bar{y}_i$
1	20	0,08	3	P 100	0,089	0,097	0,096	0,094	-2,36659
2	30	0,08	3	P 100	0,182	0,174	0,178	0,178	-1,72616
3	20	0,2	3	P 100	0,438	0,484	0,473	0,465	-0,76566
4	30	0,2	3	P 100	0,613	0,603	0,608	0,608	-0,49766
5	20	0,08	6	P 100	0,182	0,198	0,180	0,187	-1,67906
6	30	0,08	6	P 100	0,327	0,334	0,323	0,328	-1,11454
7	20	0,2	6	P 100	1,039	1,060	1,058	1,052	0,05066
8	30	0,2	6	P 100	1,198	1,218	1,213	1,210	0,19055
9	20	0,08	3	P 280	0,070	0,064	0,068	0,067	-2,70008
10	30	0,08	3	P 280	0,099	0,132	0,129	0,120	-2,12110
11	20	0,2	3	P 280	0,201	0,209	0,216	0,209	-1,56782
12	30	0,2	3	P 280	0,334	0,340	0,329	0,334	-1,09542
13	20	0,08	6	P 280	0,150	0,157	0,148	0,152	-1,88717
14	30	0,08	6	P 280	0,224	0,234	0,237	0,232	-1,46217
15	20	0,2	6	P 280	0,380	0,424	0,417	0,407	-0,89943
16	30	0,2	6	P 280	0,639	0,642	0,651	0,644	-0,43969

Tabelle 6.10: Ergebnisse des Modellierungsplans für St37

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß für dieses Modell beträgt $R^2_{adj} = 0,985$, womit eine hohe Genauigkeit der Anpassung an die Versuchsergebnisse gewährleistet ist. Ein weiteres Maß für die Anpassungsgüte des Modells sind die in Abbildung 6.6 dargestellten Residuenplots, die die Anpassungsfehler (Residuen) des Regressionsmodells für verschiedene Einflussgrößen graphisch veranschaulichen. Das Regressionsmodell ist nach Weihs et al. akzeptabel [WJG99] wenn:

1. Die Nullachse „mitten durch die Regression“ geht.
2. Die Streuung der Residuen überall gleich ist.
3. Die Residuen auch keine andere Struktur zeigen.

Die Residuenplots in Abbildung 6.6 erfüllen alle diese Bedingungen, was eine hohe Genauigkeit der Modellanpassung bestätigt.

AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG

<i>Regressions-Statistik</i>	
Multipler Korrelationskoeffizient	0,994915034
Bestimmtheitsmaß	0,989855925
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,984783888
Standardfehler	0,103008107
Beobachtungen	16

ANOVA			
	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>
Regression	5	10,35386153	2,070772306
Residue	10	0,106106701	0,01061067
Gesamt	15	10,45996823	

	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Untere 95%</i>	<i>Obere 95%</i>
Schnittpunkt	-1,255083594	0,025752027	-1,312462685	-1,1977045
X1	0,211810234	0,025752027	0,164431143	0,27918932
X2	0,627023999	0,025752027	0,569644908	0,68440309
X3	0,349977539	0,025752027	0,292598448	0,40735663
X4	-0,266526211	0,025752027	-0,323905302	-0,2091471
X2*X4	-0,106004581	0,025752027	-0,163383672	-0,0486255

Tabelle 6.11: Ergebnis der Regression-Analyse-Funktion von MS Excel für den Modellierungsplan für St37

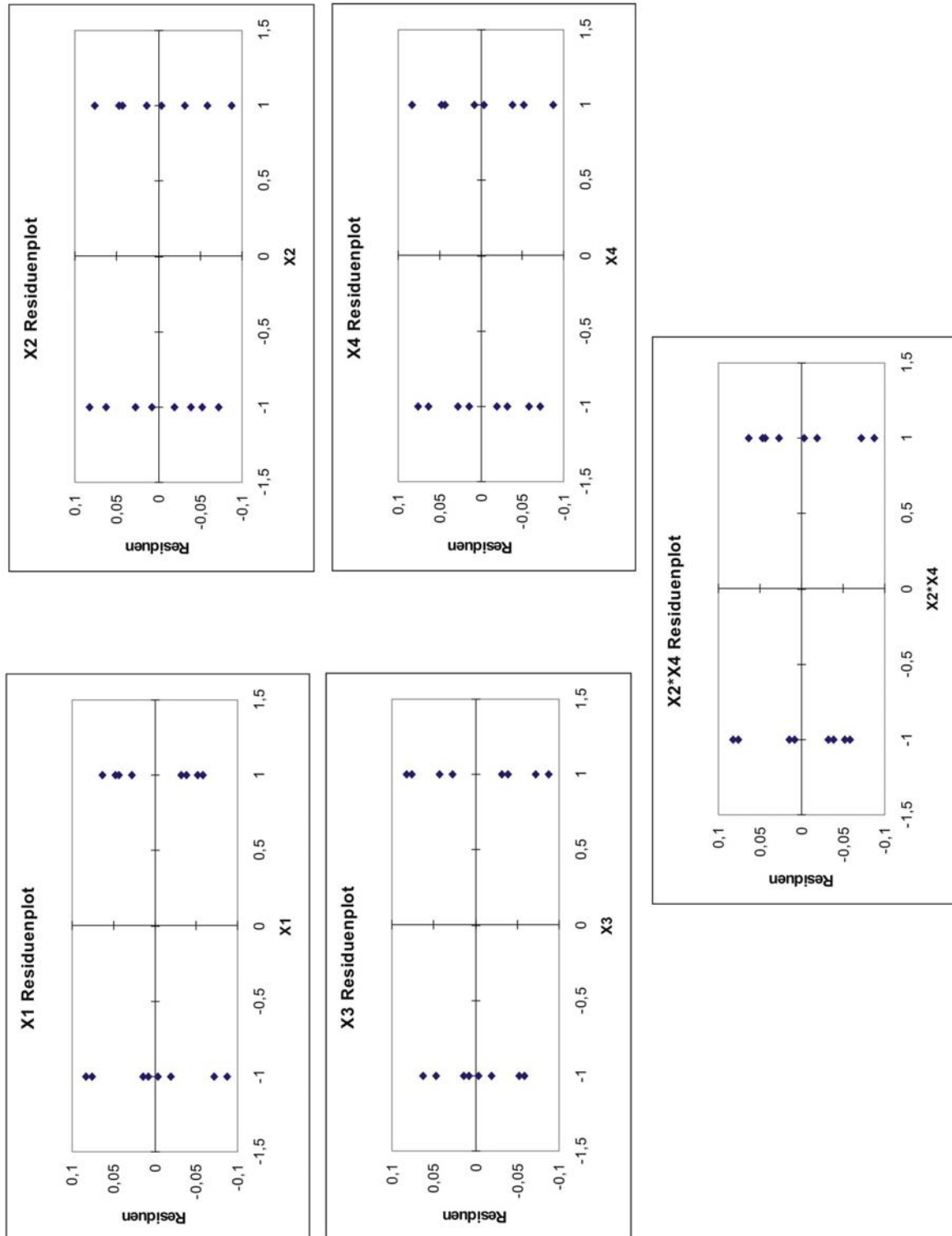


Abbildung 6.6: Residuenplots des Modells für St37

Die Interaktion zwischen den Einflussgrößen „lokaler Andruck“ und „Körnung des Schleifbandes“ bedeutet, dass der Effekt des Andrucks auf den Abtrag von der Körnung des Schleifbandes abhängt. Da die Körnung des Schleifbandes keine kontinuierliche quantitative Eingangsgröße ist, kann dieser Faktor auch als qualitativ bezeichnet werden. Hier wird die Körnung P 100 als Repräsentant für gröbere Körnungen angenommen, und die feineren Körnungen werden mit der Körnung P 280 vertreten. Zwecks besserer Übersichtlichkeit werden nun einzelne Modelle für grobe und feine Körnung getrennt betrachtet. Der Effekt der Schleifzeit auf den lokalen Abtrag ist gleich 1 und dieser Zusammenhang kann als linear betrachtet werden. Deswegen wird angenommen, dass die Abtragungsgeschwindigkeit (\dot{a}_{lok}) als erste Ableitung des lokalen Abtrags über die Schleifzeit konstant bleibt. Die aus der Versuchsserie resultierenden einzelnen Modelle für die Abtragungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Körnungen des Schleifbandes sind durch

$$\dot{a}_{lok} = 0,101 \cdot v_s^{1,05} \cdot q_{lok}^{1,7} \text{ (mm/s), für „P 100“} \quad (6.14)$$

und

$$\dot{a}_{lok} = 0,023 \cdot v_s^{1,05} \cdot q_{lok}^{1,23} \text{ (mm/s), für „P 280“} \quad (6.15)$$

gegeben.

6.5.2.2 Auswertung des Modellierungsplans für Messing

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsserien mit Messing als Werkstoff des Werkstücks werden in Tabelle 6.12 dargestellt.

Die durchgeführte Regressionsanalyse (Tabelle 6.13) hat gezeigt, dass nur die Hauptfaktoren die Zielgröße signifikant beeinflussen. Im Gegensatz zum Baustahl St37 wurde keine Interaktion mit einem signifikanten Einfluss festgestellt. Die durch Regression erhaltenen Modelle für Messing als Werkstoff des Werkstücks lauten:

$$a_{lok} = 48,53 \cdot t_s \cdot v_s^{1,05} \cdot q_{lok}^{1,07} \cdot k_{wz}^{-1,36} \text{ (mm)} \quad (6.16)$$

$$\dot{a}_{lok} = 0,092 \cdot v_s^{1,05} \cdot q_{lok}^{1,07} \text{ (mm/s), für „P 100“} \quad (6.17)$$

$$\dot{a}_{lok} = 0,023 \cdot v_s^{1,05} \cdot q_{lok}^{1,07} \text{ (mm/s), für „P 280“} \quad (6.18)$$

Mit einem adjustiertem Bestimmtheitsmaß von 0,9834 und mit der in Abbildung 6.7 dargestellten Residuenplots, die die o. g. Bedingungen erfüllen, zeigen die Regressionsmodelle eine hohe Anpassungsgenauigkeit.

Vers. Nr.	v_s (x_1) (m/s)	q_{lok} (x_2) (N/mm ²)	t_s (x_3) (s)	k_{wz} (x_4) (-)	$a_{lok}(y)$ (mm)				
					Mess- punkt 1	Mess- punkt 2	Mess- punkt 3	\bar{y}_i	$\ln \bar{y}_i$
1	20	0,08	3	P 100	0,454	0,470	0,491	0,472	-0,75175
2	30	0,08	3	P 100	0,645	0,658	0,658	0,654	-0,42516
3	20	0,2	3	P 100	1,083	1,101	1,093	1,092	0,08829
4	30	0,2	3	P 100	1,826	1,845	1,821	1,831	0,60468
5	20	0,08	6	P 100	0,949	0,980	0,977	0,969	-0,03183
6	30	0,08	6	P 100	1,159	1,148	1,152	1,153	0,14221
7	20	0,2	6	P 100	2,328	2,369	2,345	2,347	0,85328
8	30	0,2	6	P 100	3,594	3,532	3,602	3,576	1,27429
9	20	0,08	3	P 280	0,083	0,095	0,100	0,093	-2,37875
10	30	0,08	3	P 280	0,173	0,191	0,194	0,186	-1,68201
11	20	0,2	3	P 280	0,290	0,293	0,302	0,295	-1,22121
12	30	0,2	3	P 280	0,372	0,404	0,402	0,393	-0,93479
13	20	0,08	6	P 280	0,218	0,252	0,242	0,237	-1,43786
14	30	0,08	6	P 280	0,275	0,304	0,309	0,296	-1,21740
15	20	0,2	6	P 280	0,494	0,474	0,536	0,501	-0,69048
16	30	0,2	6	P 280	1,081	1,098	1,079	1,086	0,08250

Tabelle 6.12: Ergebnisse des Modellierungsplans für Messing

6.6. Einflüsse der wichtigsten Prozessparameter auf den Abtrag

Um die Einflüsse der wichtigsten Prozessparameter auf den Abtrag weiter zu untersuchen, wurden zusätzliche Versuchsserien durchgeführt, wobei jeweils nur der zu untersuchende Parameter variiert wurde. Die Ergebnisse dieser Versuchsserien werden hier dargestellt und mit den Ergebnissen des erhaltenen mathematischen Modells verglichen.

AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG

<i>Regressions-Statistik</i>	
Multipler Korrelationskoeffizient	0,99392743
Bestimmtheitsmaß	0,987891736
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,983488731
Standardfehler	0,126977936
Beobachtungen	16

ANOVA			
	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>
Regression	4	14,47027155	3,617567888
Residue	11	0,177357359	0,016123396
Gesamt	15	14,64762891	

	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Untere 95%</i>	<i>Obere 95%</i>
Schnittpunkt	-0,48287469	0,031744484	-0,552743828	-0,4130056
X1	0,21341525	0,031744484	0,143546112	0,28328439
X2	0,48994331	0,031744484	0,420074171	0,55981245
X3	0,354713237	0,031744484	0,284844099	0,42458238
X4	-0,702125328	0,031744484	-0,771994466	-0,6322562

Tabelle 6.13: Ergebnis der Regression-Analyse-Funktion von MS Excel für den Modellierungsplan für Messing

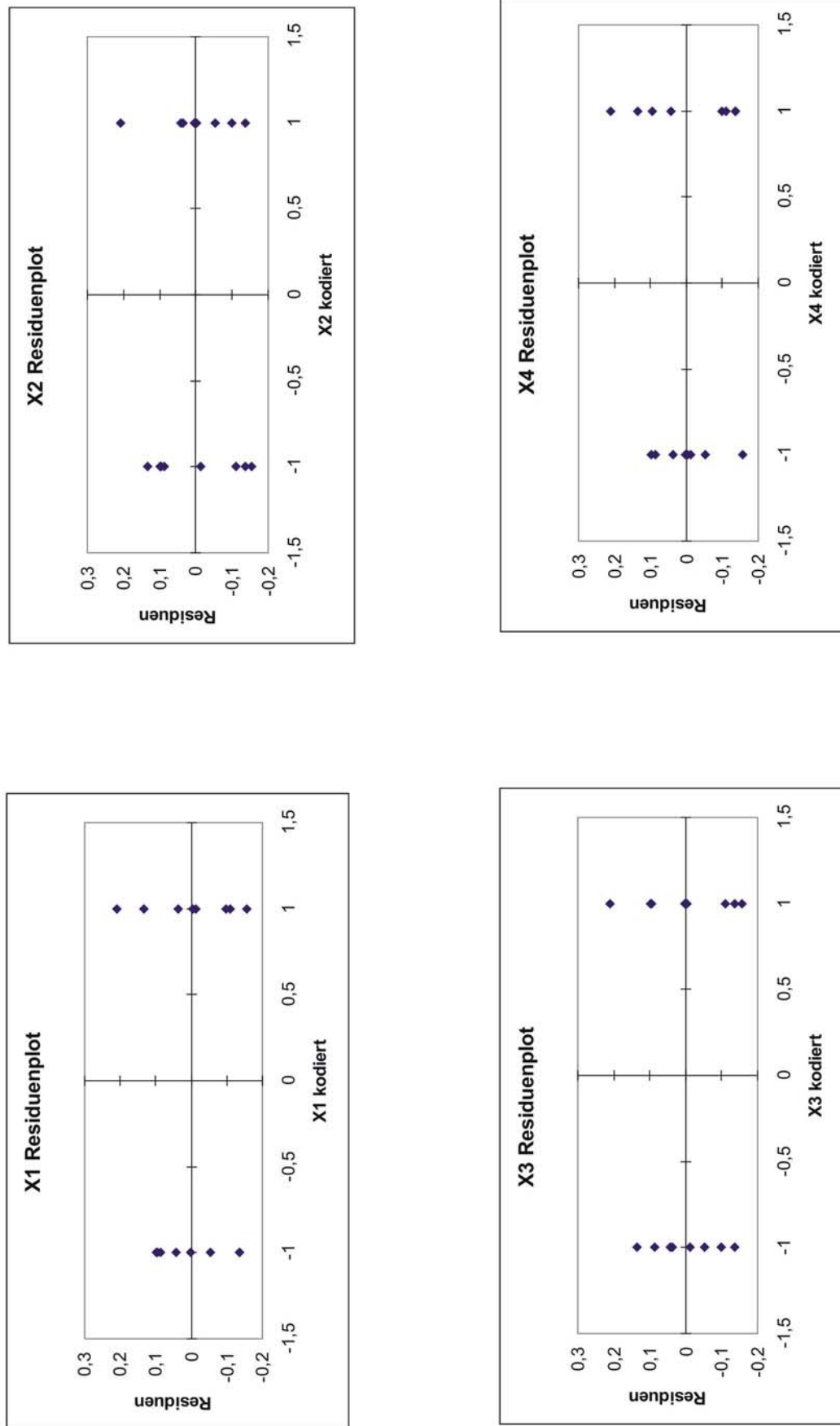


Abbildung 6.7: Residuenplots des Modells für Messing

6.6.1. Einfluss der Schnittgeschwindigkeit

Da die Schleifversuche bei der Modellierung der lokalen Zusammenhänge statisch durchgeführt wurden (d. h. ohne Vorschubbewegung des Werkstücks) entspricht die Schnittgeschwindigkeit in diesem Fall der Geschwindigkeit des Schleifbandes. In der Praxis ergibt sich die Schnittgeschwindigkeit als Vektorsumme der Vorschubgeschwindigkeit und der Bandgeschwindigkeit.

Den bisherigen, überwiegend theoretischen, Untersuchungen zufolge [u. a. KK96, Sch03], hat die Schnittgeschwindigkeit einen linearen Einfluss auf den Abtrag. Eine leichte Abweichung von dieser Erkenntnis in unserem Modell ($\beta=1,05$ siehe Gleichungen 6.13-6.18) erklärt sich durch eine etwas unruhige Funktion der Bandschleifmaschine bei kleineren Bandgeschwindigkeiten an der unteren Grenze des Wertebereichs. Es wurden keine Wechselwirkungen mit anderen Faktoren festgestellt.

Um den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit zu verifizieren, wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, wobei nur diese Einflussgröße auf mehreren Stufen variiert wurde, während alle anderen Faktoren konstant geblieben sind. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe, sowie die Werte der konstanten Faktoren sind in Abbildung 6.8 gegeben, wobei nur eine geringe Abweichung der Versuchsergebnisse vom erhaltenen mathematischen Modell zu beobachten ist.

Ein linearer Zusammenhang zwischen Abtrag und Schnittgeschwindigkeit wird in der Theorie durch die erhöhte Anzahl der Schleifkörner, die in das Werkstück eindringen, bei einer Steigerung der Schnittgeschwindigkeit erklärt. Da die Schleifkörner an der Unterlage bei Herstellung von Schleifbändern zufällig angeordnet werden, wurde vermutet, dass dadurch das Schleifergebnis beeinflusst werden kann. Die hier durchgeführten Versuche haben jedoch gezeigt, dass sich die unregelmäßige Anordnung der Schleifkörner in den Grenzen des tolerierbaren statistischen Fehlers hält und keinen signifikanten Einfluss auf den Abtrag hat.

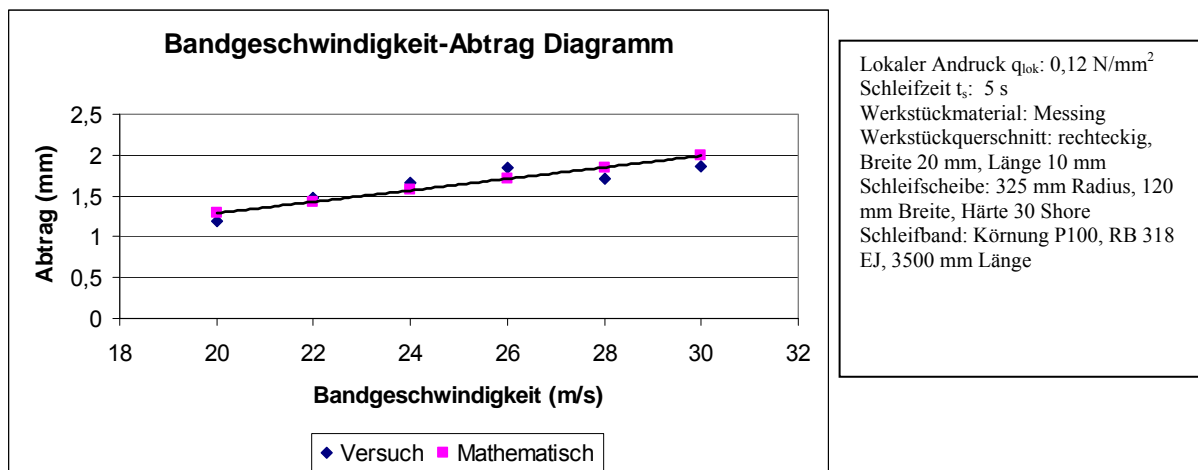


Abbildung 6.8: Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf den Abtrag

Da eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit eine nahezu lineare Erhöhung des Abtrags verursacht, ist es möglich die Abtragsleistung eines Schleifprozesses durch höhere Werte dieser Einstellgröße zu steigern. Eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit kann durch eine Steigerung der Bandgeschwindigkeit erreicht werden. Allerdings erreichen momentan vertriebene Bandschleifmaschinen i.d.R. maximale Bandgeschwindigkeiten von etwa 35-40 m/s, abhängig vom Durchmesser der Kontaktscheibe. Deshalb ist eine Weiterentwicklung existierender Anlagentechnik bzw. die Entwicklung neuer Anlagentechnik notwendig, um eine weitere Erhöhung der Abtragsleistung zu erreichen.

Eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit kann den Bearbeitungsprozess beschleunigen. In diesem Fall verkürzt sich aber die Schleifzeit für die einzelnen Teile der Oberfläche und die Abtragsleistung sinkt. Diese Senkung der Abtragsleistung könnte durch eine Steigerung der Bandgeschwindigkeit kompensiert werden. Inwieweit eine solche Anpassung des Bearbeitungsprozesses sinnvoll ist, hängt auch von der Komplexität der zu bearbeitenden Oberfläche ab. Darüber muss im konkreten Anwendungsfall entschieden werden.

6.6.2. Einfluss des lokalen Andrucks

Neben der Schnittgeschwindigkeit ist der Andruck, den das Werkzeug auf die Werkstückoberfläche ausübt, die wichtigste Eingangsgröße eines Bandschleifprozesses. Der Andruck wird durch die Eingriffstiefe eines Werkzeugs in die Oberfläche eines Werkstücks eingestellt, und ist von den elastischen Eigenschaften des Kontaktscheibe-Schleifband-Systems, sowie von der Form der Werkstückoberfläche abhängig. Da beim Schleifen von frei geformten Oberflächen die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück stark variiert, wird der variierende Andruck, wie schon erwähnt (siehe Abschnitt 2.8.2), lokal betrachtet.

Das Modell zeigt ein Zusammenwirken zwischen den Einflussgrößen „lokaler Andruck“, „Körnung des Schleifbandes“ und „Werkstoff des Werkstücks“ d. h. der Effekt des Andrucks auf den Abtrag hängt von der Körnung des Schleifbandes und dem Werkstoff des Werkstücks ab. Bei härteren Werkstoffen, wie Baustahl St37, können die Körner des Schleifbandes erst bei höheren Andrücken vollständig in das Werkstück eindringen, wodurch sich ein stärkerer, nicht linearer Effekt des lokalen Andrucks auf den lokalen Abtrag ergibt ($\beta=1,7$ für P 100 und $\beta=1,23$ für P 280, siehe Gleichungen 6.14 und 6.15). Den stärkeren Effekt des lokalen Andrucks auf den lokalen Abtrag und die Abtragungsgeschwindigkeit bei gröberen Körnungen des Schleifbandes kann man durch die tiefere Eindringung der größeren Körner in das Werkstück bei höheren Werten des Andrucks erklären. Im Gegensatz dazu konnte beim Messing ein nahezu linearer Einfluss des Andrucks auf den Abtrag festgestellt werden ($\beta=1,07$, siehe Glei-

6. Modellierung lokaler Zusammenhänge mit Hilfe statistischer Versuchsplanung

chungen 6.16-6.18), da ein weicherer Werkstoff des Werkstücks eine regelmäßige Eindringung der Schleifkörner in das Werkstück ermöglicht.

Eine vermutete Wechselwirkung zwischen dem lokalen Andruck und der Schleiflänge [Sch03] konnte bei der Modellbildung nicht festgestellt werden. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass sich ein überproportionaler Zusammenhang zwischen dem lokalen Andruck und dem lokalen Abtrag nur bei härteren Werkstückwerkstoffen, wie oben beschrieben, ergibt.

Bei den Verifikationsversuchen wurde der lokale Andruck auf mehreren Stufen für zwei verschiedene Werkstoffe (Messing und St37) und zwei verschiedene Körnungen (P 100 und P 280) variiert. Sehr kleine Abweichungen der Versuchsergebnisse vom mathematischen Modell bestätigen eine gute Genauigkeit des erhaltenen Modells (Abbildung 6.9 und 6.10).

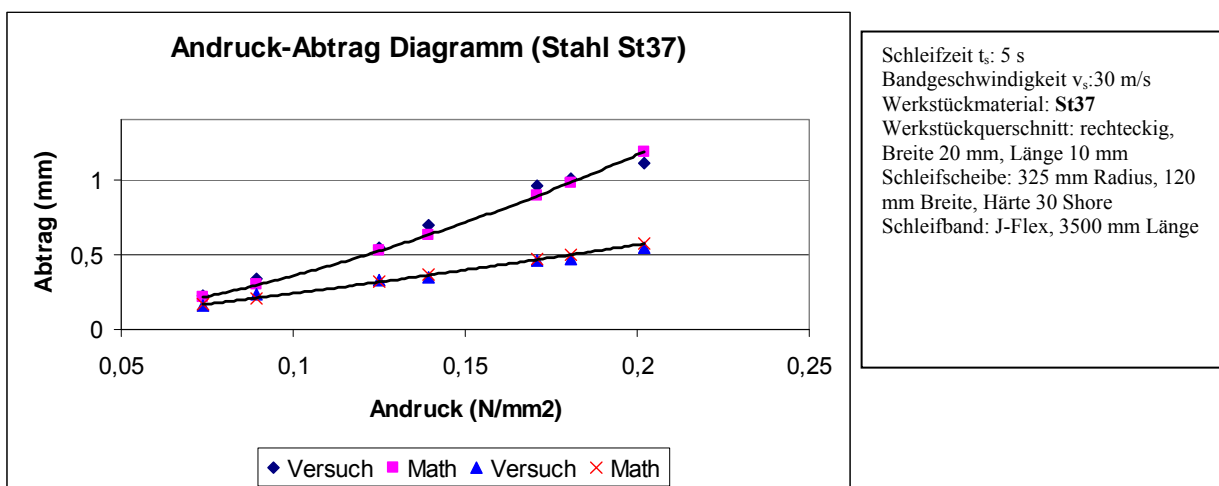


Abbildung 6.9: Einfluss des lokalen Andrucks auf den Abtrag für St37

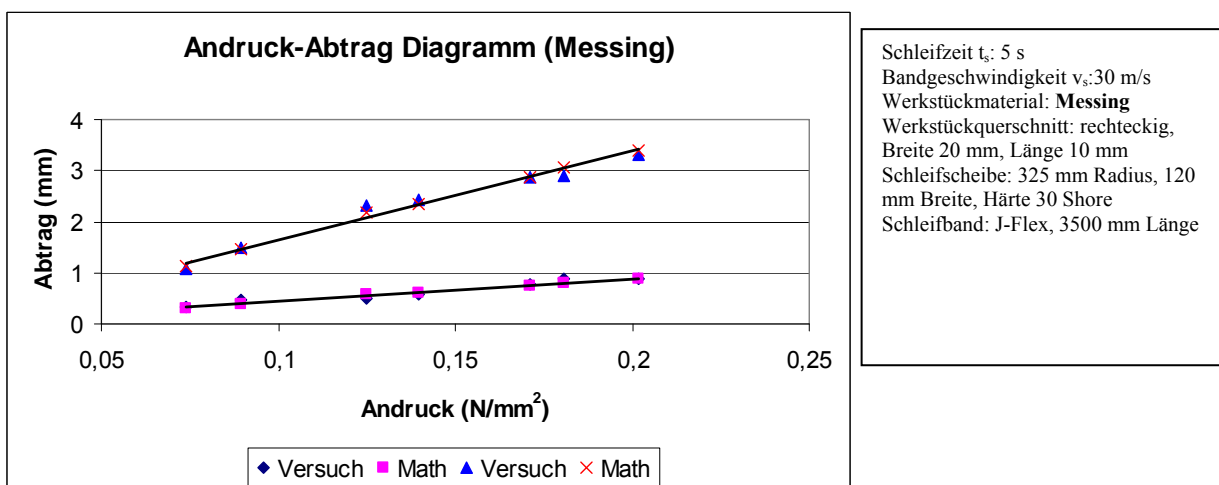


Abbildung 6.10: Einfluss des lokalen Andrucks auf den Abtrag für Messing

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Abtragsleistung eines Schleifprozesses durch eine Erhöhung des Andrucks zwischen Werkstück und Werkzeug in einem geringen Maße gesteigert werden kann, wobei die Sicherheit des Prozesses wegen einer zu hohen Andruckkraft nicht gefährdet werden darf. Eine Erhöhung des Andrucks kann auch eine Maßnahme für den Ausgleich des Verschleißes innerhalb der Standzeit des Schleifbandes sein.

6.6.3. Einfluss der Schleifzeit

Die Schleifzeit ist ein wichtiger Parameter des Bandschleifprozesses, der in der Praxis über die Vorschubgeschwindigkeit des Werkstücks eingestellt wird. Bei der Modellierung konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Schleifzeit und lokalem Abtrag ($\beta=1$, siehe Gleichungen 6.13 und 6.16) festgestellt werden. Es wurden keine signifikanten Wechselwirkungen mit anderen Faktoren bei der Auswertung von Versuchsergebnissen festgestellt.

Der lineare Zusammenhang zwischen Schleifzeit und lokalem Abtrag hat bestätigt, dass die Abtragungsgeschwindigkeit (\dot{a}_{lok} mm/s) als erste Ableitung des lokalen Abtrags über die Schleifzeit konstant bleibt. Dadurch wird die auf Zeitdiskretisierung basierte Simulation eines dynamischen Bandschleifprozesses (mit relativer Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug in Vorschubrichtung) vereinfacht.

Die Verifikationsversuche mit der Schleifzeit als variierende Einflussgröße haben eine hohe Genauigkeit des Modells bestätigt (siehe Abbildung 6.11). Ähnlich wie bei der Untersuchung des Einflusses der Schnittgeschwindigkeit auf den Abtrag (siehe Abschnitt 6.6.1) haben diese Versuche gezeigt, dass die Anordnung der Schleifkörner auf der Unterlage das Schleifergebnis nicht signifikant beeinflusst.

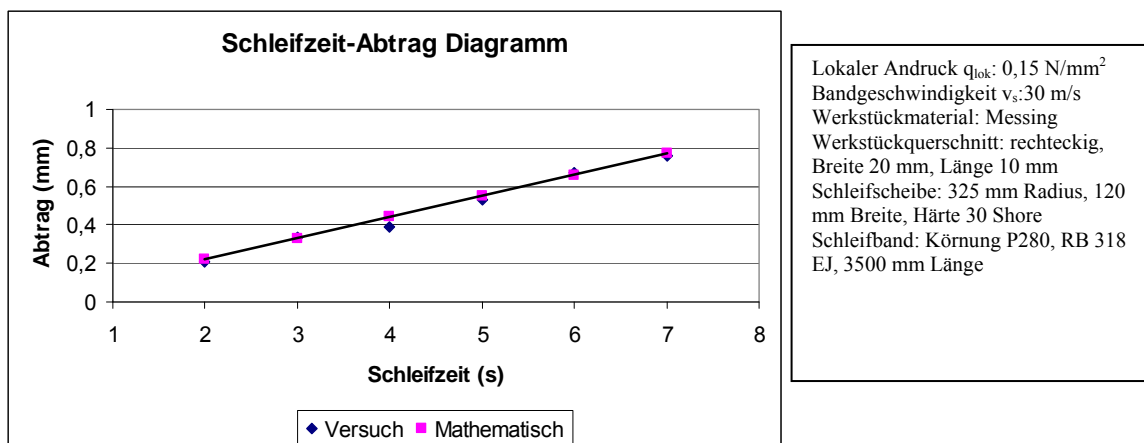


Abbildung 6.11: Einfluss der Schleifzeit auf den Abtrag

Eine Erhöhung der Schleifzeit führt einerseits zu einer verbesserten Abtragsleistung des Schleifprozesses. In der Praxis wird das durch eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit er-

zielt. Auf der anderen Seite erhöhen sich dadurch die Taktzeiten für die Bearbeitung, was sich insbesondere bei der Großserienfertigung negativ auf die Produktivität auswirkt. Eine Steigerung der Schleifzeit bedeutet auch eine Erhöhung des Wärmeeintrags, was unerwünschte Veränderungen der Materialeigenschaften des Werkstücks verursachen kann. Deshalb wird diese Methode zur Steigerung der Abtragsleistung in der Praxis selten benutzt.

6.6.4. Einfluss der Körnung des Schleifbandes

Die durchgeführten Versuchsserien haben einen signifikanten Einfluss der Bandkörnung auf den lokalen Abtrag gezeigt. Bei der Verwendung von Schleifbändern mit gröberer Körnung konnte viel mehr Material abgetragen werden, da die größeren Körner tiefer in das Werkstück eindringen können als die Körner der feineren Schleifbänder. Die Eindringungstiefe und die Abtragsleistung einzelner Körner sind auch von den Materialeigenschaften des Werkstücks abhängig. Wie schon im Abschnitt 6.6.2 erwähnt, konnte bei der Modellbildung eine Wechselwirkung von lokalem Abtrag und Bandkörnung auf die Zielgröße bei den härteren Werkstoffen (St37) festgestellt werden.

Es ist möglich, die Abtragsleistung eines Schleifprozesses durch die Verwendung der größeren Schleifbänder zu steigern. Dabei müssen allerdings die Anforderungen für die Rauheit der Werkstückoberfläche erfüllt werden. In der Praxis ist es oft der Fall, dass ein Werkstück zunächst mit gröberen Bändern vorgeschliffen wird, um die gewünschte Form zu erhalten oder die Fehler auf der Oberfläche zu eliminieren. Danach wird ein feineres Schleifband benutzt, damit die Rauheit der Oberfläche reduziert wird. Dadurch wird die Werkstückoberfläche für die nachfolgenden Bearbeitungsprozesse (z. B. Polieren) vorbereitet.

6.6.5. Einfluss der Kontaktlänge

Im Gegensatz zum linearen Zusammenhang bei globalen Betrachtungen des Prozesses wurde in den ersten Messungen [Sch03] ein überproportionales Verhältnis zwischen lokaler Andruckkraft und lokalem Abtrag ermittelt. Die sinkende Abtragsleistung wurde auf den erhöhten Zerspanndruck durch eine abnehmende Kontaktfläche bzw. Kontaktlänge zurückgeführt. Bei der Modellierung des Bandschleifprozesses mit Hilfe der Versuchsplanung konnte jedoch kein signifikanter Einfluss der Kontaktlänge auf den lokalen Abtrag festgestellt werden. Der überproportionale Zusammenhang zwischen dem lokalen Andruck und dem lokalen Abtrag wird durch die unvollständige Eindringung der Schleifkörner bei kleineren Andruckkräften erklärt (siehe Abschnitt 6.6.2).

Um den Einfluss der Länge eines diskreten Schleifelements auf das Spanvolumen zu verifizieren, wurde ein Schleifversuch mit der Variation dieser Größe durchgeführt. Der Ver-

suchsaufbau entspricht dem bereits im Abschnitt 5.1 beschriebenen, mit dem Unterschied, dass hier die Kontaktlänge des Werkstücks variiert wird. Es wurden Werkstücke mit der Breite $B=20$ mm und der Schleiflänge $l = 7, 8, 9...20$ mm geschliffen. Die globale Andruckkraft blieb dabei unverändert. Jedes Werkstück wurde sechsmal geschliffen mit der Belastungszeit $t_B=20$ s und mit der Abkühlung nach jedem Einzelversuch. Das gesamte Spanvolumen für ein Werkstück ergibt sich dann als Summe der Spanvolumina von allen 6 Einzelversuchen. Das Ergebnis der Versuchsserie ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

Die Versuchsserie hat gezeigt, dass die Kontaktlänge keinen signifikanten Einfluss auf das Spanvolumen hat. Dadurch wird bestätigt, dass die Kontaktlänge den lokalen Abtrag bei konstantem lokalem Andruck nicht signifikant beeinflusst. Beim Schleifen von großflächigen Oberflächen ist es jedoch möglich, dass es zu einer Stauung des abgetragenen Materials in der Kontaktzone kommt, was den gesamten Abtrag beeinflussen kann. Allerdings ist das beim Schleifen von frei geformten Oberflächen selten der Fall.

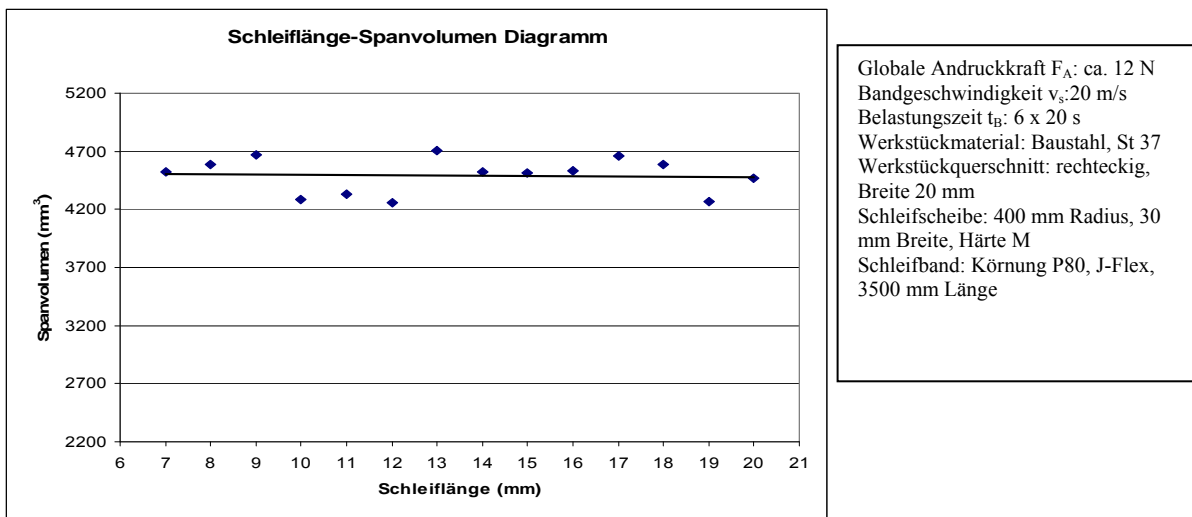


Abbildung 6.12: Einfluss der Schleiflänge auf das Spanvolumen

6.6.6. Einfluss des Radius des Werkzeugs

Bei der lokalen Betrachtung des Bandschleifprozesses erwies sich der Radius der Kontaktscheibe als eine nicht signifikante Einflussgröße auf den lokalen Abtrag (siehe Abschnitt 6.5.1). Eine Verringerung des Radius der Kontaktscheibe bewirkt, global betrachtet, eine Abnahme der Kontaktlänge. Bei konstanter Normalkraft wird dadurch der Andruck auf die Werkstückoberfläche größer, was zu einer höheren Abtragsrate führt. Dieser Effekt wird jedoch schon bei der Modellierung der Andruckverteilung mit Hilfe von FEM berücksichtigt, und spielt bei der Ermittlung lokaler Zusammenhänge keine Rolle mehr.

Theoretisch kann die Abtragsleistung eines Bandschleifprozesses durch eine Verringerung des Radius der Kontaktscheibe erzielt werden. Das ist aber sehr selten der Fall, da eine Verkleinerung des Radius zu einer niedrigeren Bandgeschwindigkeit bei konstanter Leistung der Schleifmaschine führt.

6.6.7. Einfluss der Bandspannung

Bei der Auswertung des Screening-Plans (siehe Abschnitt 6.5.1) wurde Bandspannung im ausgewählten Wertebereich als eine für das lokale Prozessergebnis nicht signifikante Einflussgröße gekennzeichnet. Die Bandspannung kann jedoch die elastischen Eigenschaften des Kontaktscheibe-Schleifband-Systems beeinflussen und soll bei der Berechnung der Andruckverteilung berücksichtigt werden.

In der Praxis ist es wichtig, die Bandspannung korrekt einzustellen. Bei höheren Bandspannungen unterliegt die gesamte Schleifmaschine höheren Belastungen und muss daher stabiler ausgeführt werden, was die Anschaffungskosten erhöht. Die Bandspannung soll nur so groß gewählt werden, dass das Schleifband von der Kontaktscheibe gut geführt wird und weder flattert noch verläuft [KK96].

6.6.8. Einfluss des Werkstoffs des Werkstücks

Die Abtragtiefe bei einem Bandschleifprozess ist in von den Werkstoffeigenschaften des Werkstücks (z. B. Härte, Steifigkeit, Zugfestigkeit, Zähigkeit) abhängig. Um den Einfluss aller genannten Größen zu berücksichtigen, wurde der Werkstoff als ein qualitativer Parameter in das Modell integriert. Dabei wurden Messing und Baustahl, in der Praxis oft verwendete Werkstoffe, für die Versuche ausgewählt. Der Einfluss anderer Werkstoffe auf den Abtrag beim Schleifen kann durch die im Kapitel 6 beschriebene Methodik untersucht werden.

Der Einfluss des Werkstoffs im hier erhaltenen Prozessmodell wird durch den Wert des freien Koeffizienten (siehe Gleichungen 6.13-6.18) quantifiziert. Die Versuche haben gezeigt, dass beim Messing, der ein relativ weicher Werkstoff ist, bei gleichen Schleifbedingungen etwa 2-3mal mehr Abtrag als beim Baustahl entsteht.

Im Abschnitt 5.3 wurde schon diskutiert, wie der auf die Abtragsleistung bezogene Wärmeeintrag die Qualität eines Bandschleifprozesses bei den verschiedenen Werkstückmaterialien beeinflussen kann. Deshalb ist es sehr wichtig, den Wärmeeinfluss und die daraus resultierende Abtragsleistung durch eine sorgfältige Auswahl der Prozessparameter in Grenzen zu halten.

6.6.9. Verifikation des Modells der lokalen Zusammenhänge

Abbildungen 6.8-6.12 zeigen die Ergebnisse der Verifikationsversuche für das Modell der lokalen Zusammenhänge. An den Bildern ist eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen des Modells zu beobachten, wobei der relative Fehler nicht die Grenze von 10% übersteigt. Die für einen komplexen Bearbeitungsprozess mit vielen Einfluss- und Störgrößen relativ hohe Modellgenauigkeit ist hier durch eine geeignete Modellierungsmethodik und einen guten Versuchsaufbau gewährleistet.

Um die Ergebnisse des Modells endgültig verifizieren zu können, ist eine Verifikation der Prozesssimulation notwendig.

Kapitel 7

Anwendungen des Bandschleifmodells in der Praxis

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie das erhaltene Modell für das Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe in der Praxis angewendet werden kann. Drei wichtige Anwendungen des Modells in der Praxis sind:

- Simulation der Bandschleifprozesse mit elastischer Kontaktscheibe,
- Kraftregelung beim industrierobotergetriebenen Bandschleifen und
- Nachbearbeitung der Produkte mit fehlerhafter Oberfläche.

7.1. Simulation der Bandschleifprozesse

Mit Hilfe der Simulation können Ergebnisse der komplexen Schleifprozesse berechnet und visualisiert werden, was eine Erkennung der Ursachen von Fehlern und Durchführung von notwendigen Optimierungen bereits in der Vorbereitungsphase des Prozesses ermöglicht. Durch die Integration des Prozessmodells, das die Einflüsse verschiedener Prozessparameter quantifiziert, verbessern sich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Simulation.

7.1.1. Prinzipieller Ablauf der Prozesssimulation

Die Zeit für die Ausführung jeder Bewegungsbahn beim Schleifen wird in kleine Zeitintervalle unterteilt und beginnt bei jeder Bahn zum Zeitpunkt $t=0$. Zunächst wird für den aktuellen

Zeitpunkt die Position und Orientierung auf der Bewegungsbahn anhand der Vorschubgeschwindigkeit ermittelt. Mit Hilfe von geometrischen Daten wird die aktuelle Kontaktsituation bestimmt, was eine Grundlage für die Berechnung der Andruckverteilung an der Werkstückoberfläche zum gegebenen Zeitpunkt ist.

Die nachfolgende Berechnung der Abtragsverteilung basiert auf dem Modell der lokalen Zusammenhänge (Kapitel 6), wobei die lokalen Andrücke mit Hilfe des Andruckverteilungsmodells bestimmt werden. Da die Abtragsgeschwindigkeit konstant bleibt (siehe Abschnitt 6.5.2), ergeben sich die lokalen Abträge für die betrachtete Kontaktsituation durch Multiplikation der Abtragsgeschwindigkeit (Gleichungen 6.14-6.18) mit dem diskreten Zeitintervall, d. h.

$$a_{lok} = \dot{a}_{lok} \cdot t_i \quad (\text{mm}) \quad (7.1)$$

Nach der Berechnung der Abtragsverteilung wird die Werkstückoberfläche aktualisiert. Im nächsten Schritt wird die Simulationszeit um ein weiteres diskretes Zeitintervall inkrementiert. Danach beginnt die Simulation mit der Aktualisierung der Position und der Orientierung für das neue Zeitintervall von vorn, wenn das Bahnende noch nicht erreicht ist. Der prinzipielle Ablauf der Prozesssimulation ist in Abbildung 7.1 gegeben.

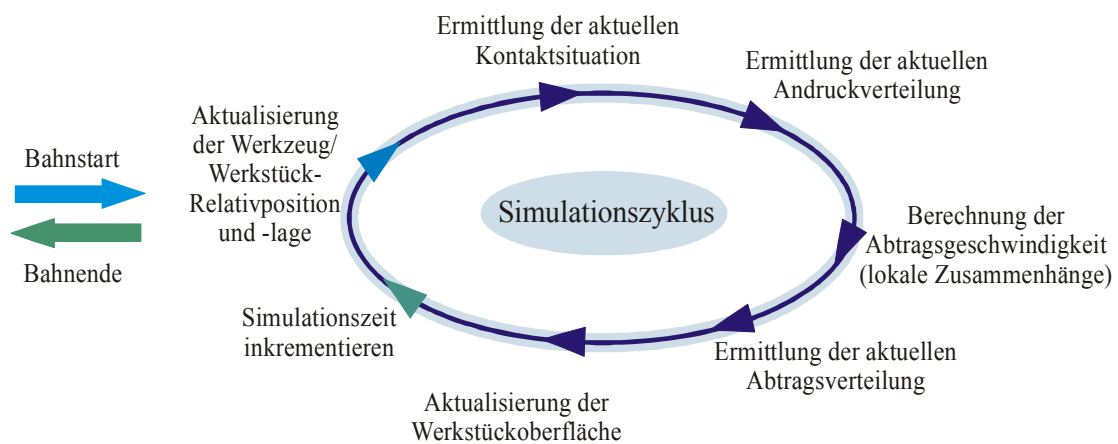


Abbildung 7.1: Prinzipieller Ablauf der Prozesssimulation [Sch03]

7.1.2. Verifikation der Simulationsergebnisse

Um die Genauigkeit der Prozesssimulation beim Bandschleifen zu überprüfen, wurden deren Ergebnisse mit den Ergebnissen eines Versuchs in einer bestehenden automatisierten Anlage für Bearbeitung und Nachbearbeitung von Sanitärarmaturen (siehe Abschnitt 3.4) verglichen. Hier wurde zunächst der Abtrag an 10 Stützpunkten einer Schleifbahn auf der Oberfläche einer Eurodisc-Sanitärarmatur von Fa. Grohe Water Technology AG & Co. KG mit Hilfe der

Prozesssimulation berechnet (siehe Abbildung 7.2). Dabei erfolgte die Ermittlung der geometrischen Kontaktdaten für jedes diskrete Zeitintervall durch Auswertung von CAD-Daten des Werkstücks und der Kontaktscheibe und ihrer aktuellen relativen Position. Bei der Berechnung der Andruckverteilung wurden die im Abschnitt 4.2.2 ermittelten Werte der Werkstoffkenngrößen des Werkzeugs benutzt. Die nachfolgende Berechnung der Abtragsgeschwindigkeit und der Abtragsverteilung wurde mit Hilfe des Modells der lokalen Zusammenhänge (Gleichung 6.17) durchgeführt. Der gesamte Abtrag an den Stützpunkten ergab sich dann als die Summe der lokalen Abträge an den betrachteten Punkten für alle diskreten Simulationsintervalle.

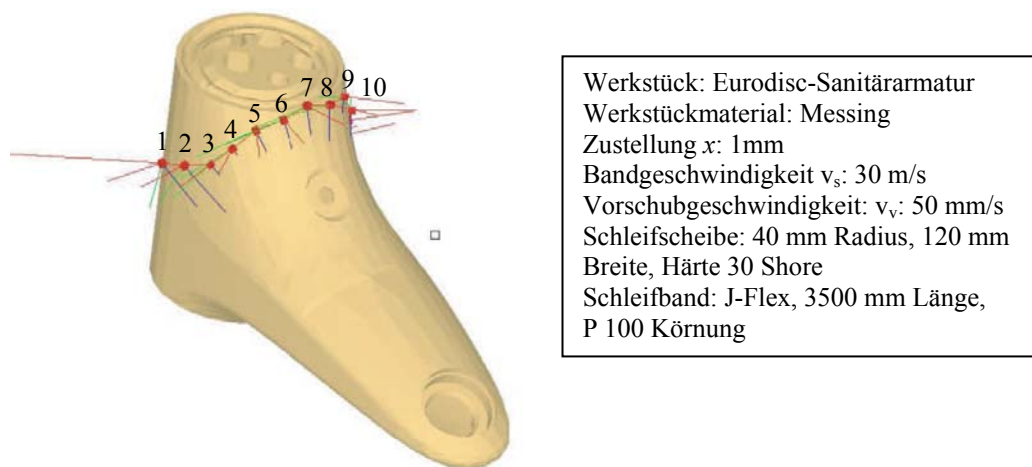


Abbildung 7.2: Die Stützpunkte der Schleifbahn und die Werte der technologischen Parameter

Das Ergebnis der Simulation für die betrachtete Schleifbahn wird graphisch in Abbildung 7.3 dargestellt.

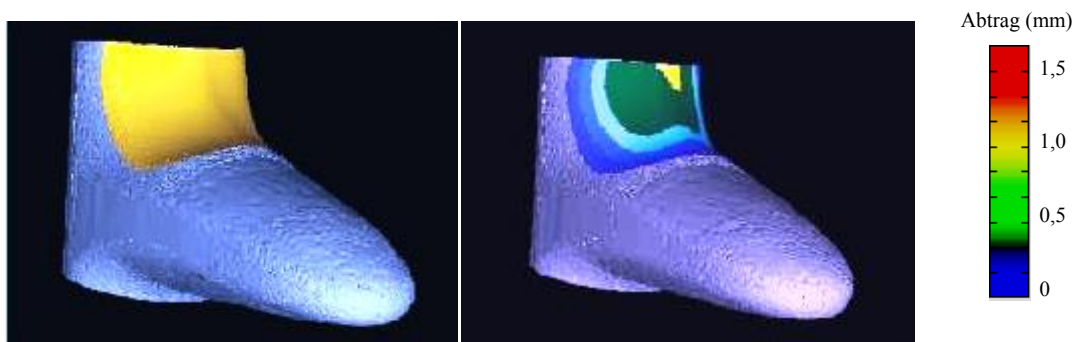


Abbildung 7.3: Graphische Darstellung des Simulationsergebnisses [RKM06]

Der Versuch wurde mit den gleichen Werten der Prozessparameter wie die Simulation durchgeführt. Der Abtrag wurde mit Hilfe eines Messtasters an den Stützpunkten gemessen. Der

Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen und die Fehler der Simulation sind in Tabelle 7.1 gegeben.

Punkt Nr.	lokaler Abtrag (mm)		absoluter Fehler (mm)	relativer Fehler (%)
	Versuch	Simulation		
1	0,019	0,091	-0,072	-378,95
2	0,202	0,457	-0,255	-126,24
3	0,322	0,528	-0,206	-63,98
4	0,720	0,626	0,094	13,06
5	0,894	0,738	0,156	17,45
6	1,050	0,842	0,208	19,81
7	1,397	1,160	0,237	16,96
8	0,852	0,705	0,147	17,25
9	0,619	0,64	-0,021	-3,39
10	0,423	0,545	-0,122	-28,84

Tabelle 7.1: Vergleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse

Der relative Simulationsfehler an den mittleren Bahnpunkten beträgt ca. 15-20%, wobei die experimentellen Werte größer sind als die Simulationswerte. Die Fehler wurden hauptsächlich durch die dynamischen Effekte und zusätzliche Zentrifugal- und Reibungskräfte, die bei der Modellierung der Andruckverteilung nicht berücksichtigt wurden, verursacht. Die Stoßwirkung bei der Kontaktscheibe mit gefrästem Laufpolster auf die Andruckverteilung wurde auch bei der Modellierung vernachlässigt. Die Integration dieser Effekte in das Prozessmodell führt zu einer Erhöhung der Simulationsgenauigkeit.

Die Übergangsprozesse in den Randzonen der Schleifbahn verursachen einen unregelmäßigen Kontakt in diesen Bereichen. Deshalb ist der Simulationsfehler bei den Einfahr- und Ausfahrpunkten größer als der bei den mittleren Punkten. Um die Genauigkeit der Prozesssimulation auch in diesen Bereichen zu erhöhen, müssen die Übergangsprozesse genauer untersucht werden. Eine sorgfältige Planung der Einfahr- und Ausfahrbewegungen kann den Einfluss der Übergangsprozesse auf das Schleifergebnis verringern und ermöglicht eine genauere Prozesssimulation.

7.2. Ein Konzept zur prozessmodellbasierten Kraftregelung des Roboters beim Bandschleifen

An dieser Stelle wird ein Konzept für eine prozessmodellbasierte Kraftregelung des Roboters, die zurzeit an IRF-IR entwickelt wird, für das Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe vorgestellt.

Die Regelung der Interaktionskraft zwischen dem Roboter und seiner Umgebung ist eine wichtige Aufgabe bei mehreren Roboteranwendungen, wie z.B. bei der Montage verschiedener Teile oder bei der Oberflächenbearbeitung, wozu auch das Bandschleifen zählt. Durch die Kraftregelung werden verbesserte Ergebnisse bei der Bearbeitung gewährleistet. Eine reine Positionsregelung reicht in diesen Fällen meistens nicht aus, weil die Umgebung während der Interaktion eine Zwangsbewegung des Effektors verursacht. Eine erfolgreiche Ausführung einer Interaktionsaufgabe ohne Kraftregelung des Roboters ist nur möglich, wenn die Umgebung exakt beschrieben ist.

Um die Interaktion zwischen dem Effektor des Roboters und der Umgebung zu quantifizieren und die Kontaktkräfte zu messen, werden meistens Kraft-/Momentensensoren angewendet. Diese Sensoren sind üblicherweise zwischen der Hand und dem Effektor des Roboters montiert und können Kräfte und Momente in verschiedenen Raumrichtungen messen. Die gemessenen Werte werden dann durch die entsprechende Schnittstelle zur Steuerungseinheit des Roboters rückgeführt. Durch die Auswertung des Messsignals und die Anwendung eines geeigneten Regelungsalgorithmus wird die Bewegungsbahn des Roboters korrigiert und ein besseres Ergebnis der Bearbeitung der Werkstückoberfläche gewährleistet.

Die Interaktionskraft zwischen dem Effektor des Roboters und der Umgebung kann entweder direkt durch das Schließen des Kraftregelungskreises oder indirekt über die Positionsregelung geregelt werden. Ein explizites Schließen des Kraftregelungskreises ist bei der indirekten Regelung nicht nötig.

Um die notwendigen Sensoren in die Robotersteuerung zu integrieren und eine externe online Regelung zu ermöglichen, bieten Roboterhersteller zusätzliche Softwaremodule. So können z. B. die Roboter der Firma ABB mit Advanced Motion Softwarepaket ausgerüstet werden, das zu einer online Bahnkorrektur durch einen überlagerten Regelungskreis dient. Die Funktion „FC Pressure“, als ein Bestandteil des neuentwickelten Softwarepakets „Robotware Machining FC“ desselben Herstellers, ermöglicht dem Roboter beliebigen Konturen mit einem konstanten Anpressdruck in der Zustellungsrichtung zu folgen. Die bei der Bearbeitung entstehenden Kräfte werden gemessen und in ein analoges Signal gewandelt. Dieses Signal wird mit einer sehr geringen Zykluszeit von 0,5 ms zur Robotersteuerung übertragen.

7.2.1. Kraftgeführtes Bandschleifen

Die Kraftregelung ermöglicht eine nachgiebige Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück. In diesem Fall kann der Roboter eine gleichmäßige Kraft in der Zustellungsrichtung auf eine gekrümmte Werkstückoberfläche aufbringen und die Kontur besser verfolgen. Der Unterschied zwischen weg- und kraftgeführter Prozessvarianten bei der Konturverfolgung ist in Abb. 7.4 gegeben.

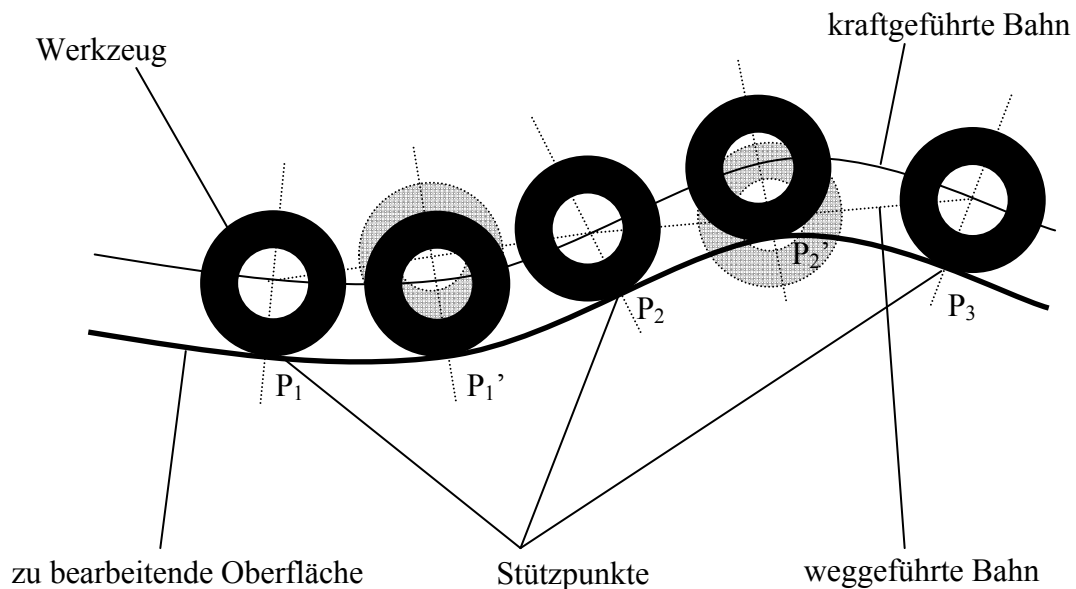


Abbildung 7.4: Unterschied zwischen weg- und kraftgeführtem Prozess

Beim weggeführten Prozess ist die Bewegung zwischen zwei benachbarten Stützpunkten linear interpoliert. Obwohl die Stützpunkte so „geteacht“ wurden, dass sie genau an der Werkstückoberfläche liegen, ändert sich die relative Position zwischen Werkzeug und Werkstück während der Bewegung. An den konkaven Bahnabschnitten gibt es stellenweise keinen Kontakt zwischen diesen zwei Körpern und an den konvexen Bahnabschnitten dringt das Werkzeug in das Werkstück ein (siehe Abb. 7.4). Das führt zu einer unregelmäßigen Abtragsverteilung bei der Bearbeitung. In der Praxis wird oft versucht, die Qualität des Prozesses zu steigern, indem die Anzahl der „geteachten“ Stützpunkte erhöht wird.

Hingegen ermöglicht die Kraftführung des Prozesses einen gleichmäßigen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück, wobei die Anzahl der „geteachten“ Stützpunkte minimiert wird. Dies führt zu einer Verbesserung der Prozessqualität und zu einer großen Zeitersparnis, da das zeitintensive „Nachteachen“ der Punkte an der Werkstückoberfläche zum größten Teil vermieden werden kann.

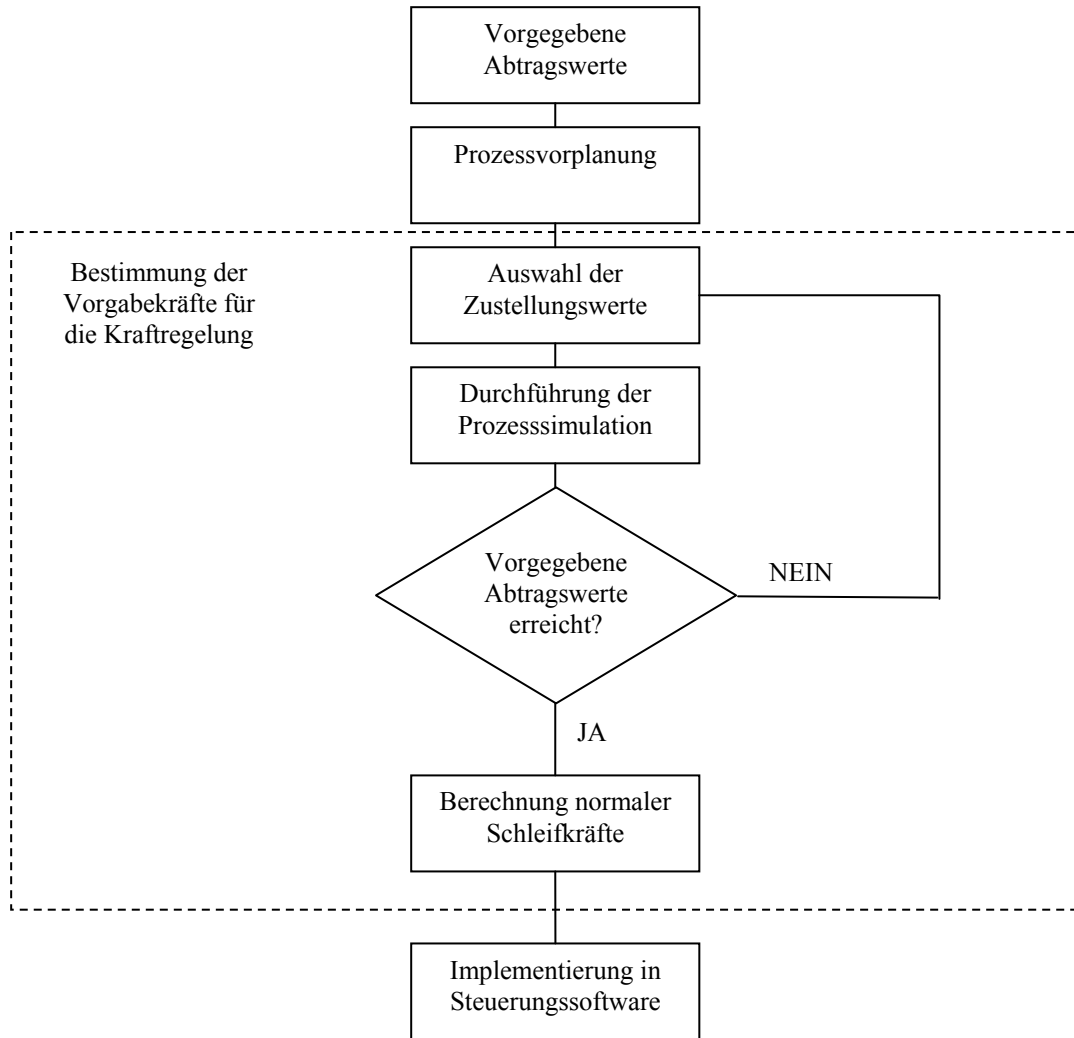


Abbildung 7.5: Konzept zur prozessmodellbasierten Kraftregelung beim Bandschleifen

Das hier entwickelte Konzept zur prozessmodellbasierten Kraftregelung des Roboters beim Bandschleifen umfasst drei wichtige Phasen (siehe Abb. 7.5):

1. Prozessvorplanung
2. Bestimmung der Vorgabekraft
3. Implementierung ins Steuerungssystem

Auf Basis von vorgegebenen Abtragswerten an der Werkstückoberfläche und von der Geometrie des Werkstücks wird der Prozess geplant, indem die für die Kraftführung geeigneten Schleifbahnen erzeugt werden. An dieser Stelle wird auch entschieden, welche Teile der Werkstückoberfläche mit einer Kraftführung des Prozesses nicht adäquat bearbeitet werden können. Nach der Erzeugung der Bahnen sind die Vorgabekräfte in der Zustellungsrichtung für einzelne Bahnabschnitte mit Hilfe der Prozesssimulation zu bestimmen. Die Werte der

Vorgabekräfte werden dann durch eine für die Kraftregelung geeignete Funktion (wie z. B. schon erwähnte „FC Pressure“ Funktion) in das Steuerungssystem des Roboters übertragen.

7.2.2. Prozessvorplanung

Wie schon erwähnt, sinkt bei einer Kraftführung des Bandschleifprozesses die Anzahl der notwendigen Stützpunkte an der Werkstückoberfläche. Da die Kraft nur in der Zustellungsrichtung geregelt wird, sollen die Stützpunkte so orientiert werden, dass sich die Zustellungsrichtung und die Normalenrichtung an der zu bearbeitenden Oberfläche überlappen, oder möglichst nah zueinander liegen.

Der kraftgeführte Schleifprozess soll weiterhin so geplant werden, dass sich die Vorgabekraft zwischen zwei benachbarten Stützpunkten so wenig wie möglich ändert, d. h. eine Schleifbahn soll einen Oberflächenteil mit einer nahezu konstanten Krümmung überdecken. Zu starke Schwankungen der Vorgabekraft können den Kraftregelkreis überfordern, was zu einem nicht ausreichenden Prozessergebnis führt.

Bei der Bearbeitung von Oberflächenteilen mit kleinen Krümmungsradien soll auf die Kraftführung verzichtet werden, da in diesem Bereich eine kleine Veränderung der Normalenkraft wegen der kleinen Kontaktfläche eine bedeutende Erhöhung des lokalen Andrucks verursacht. Die schnelle Umorientierung des Roboters, die bei der Ausführung einer gekrümmten Bahn notwendig ist, beansprucht zusätzlich die Steuerungs- und Antriebssysteme, die beim heutigen Stand der Technik noch nicht in der Lage sind, eine solche Aufgabe mit einer hohen Präzision zu lösen. Die Normalenkräfte, die bei der Bearbeitung von stark gekrümmten oder dünnen Teilen der Werkstückoberfläche (z. B. Austrittskanten von Turbinenschaufeln) auftreten, sind meistens sehr klein und können mit den Kraftsensoren nicht genau erfasst werden. Deshalb verursacht die Kraftführung in diesen Fällen oft Bruchschaden am Werkstück und soll durch die Wegführung des Prozesses ersetzt werden.

Beim kraftgeführten Bandschleifprozess müssen die An- und Abfahrbewegungen besonders sorgfältig geplant werden, um die Sollkontur des Werkstücks an den Bahngrenzen nicht zu verletzen. Beim Anfahren des ersten Stützpunktes führt der Roboter das Werkstück ganz langsam, wobei die Kraft in der Zustellungsrichtung auf Null gesetzt wird. Nach dem Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück wird die Kraft auf den gewünschten Vorgabewert ausgegeregelt. Die Kraftregelung wird nach dem Erreichen des Ausfahrpunktes an der Oberfläche sofort ausgeschaltet.

7.2.3. Bestimmung der Vorgabekraft

Nachdem die Schleifbahnen in der Prozessvorplanung definiert werden, wird in dieser Phase die Vorgabekraft für die einzelnen Stützpunkte bestimmt. Da die Prozesssimulation zurzeit ein rechenintensiver Prozess ist, erfolgt die Bestimmung der Vorgabekraft ($F_{n,soll}$) offline, wobei von einem gewünschten Abtragswert an einem betrachteten Stützpunkt auf der Werkstückoberfläche ausgegangen wird (siehe Abbildung 7.6). Durch eine iterative inverse Prozesssimulation wird anhand der technologischen Parameter die Zustellung ermittelt, die dem gewünschten Wert des Abtrags entspricht. Dabei wird der Zustellungswert variiert und die Simulation so lange wiederholt, bis die entsprechenden Abtragswerte geliefert werden (siehe Abbildung 7.5).

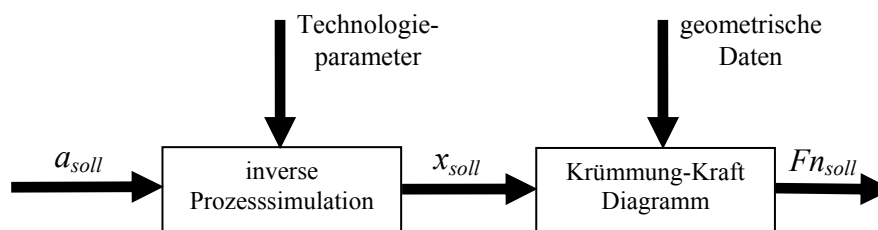


Abbildung 7.6: Berechnung der Vorgabekraft bei der Kraftregelung

Die Vorgabekraft in der Normalenrichtung wird danach mit Hilfe der Zustellung-Kraft-Diagramme (siehe Abschnitt 4.2.3) anhand der geometrischen Daten (Krümmungsradien) berechnet.

Die Bildung eines genauen Prozessmodells ist den obigen Ausführungen zufolge ein sehr wichtiger Schritt für die Umsetzung des hier beschriebenen Konzepts zur Kraftregelung beim Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe.

7.2.4. Integration in das Roboterprogrammier- und Steuerungssystem

Nach der Berechnung werden die Vorgabekräfte mit Hilfe eines für die Kraftregelung geeigneten Softwarepakets in die Robotersteuerung übertragen. Ein solches Softwarepaket ermöglicht eine parallele Position-Kraft-Regelung (direkte Kraftregelung), bei der der äußere Kraftregelungskreis der inneren Positionsregelung des Roboters überlagert ist (siehe Abbildung 7.7).

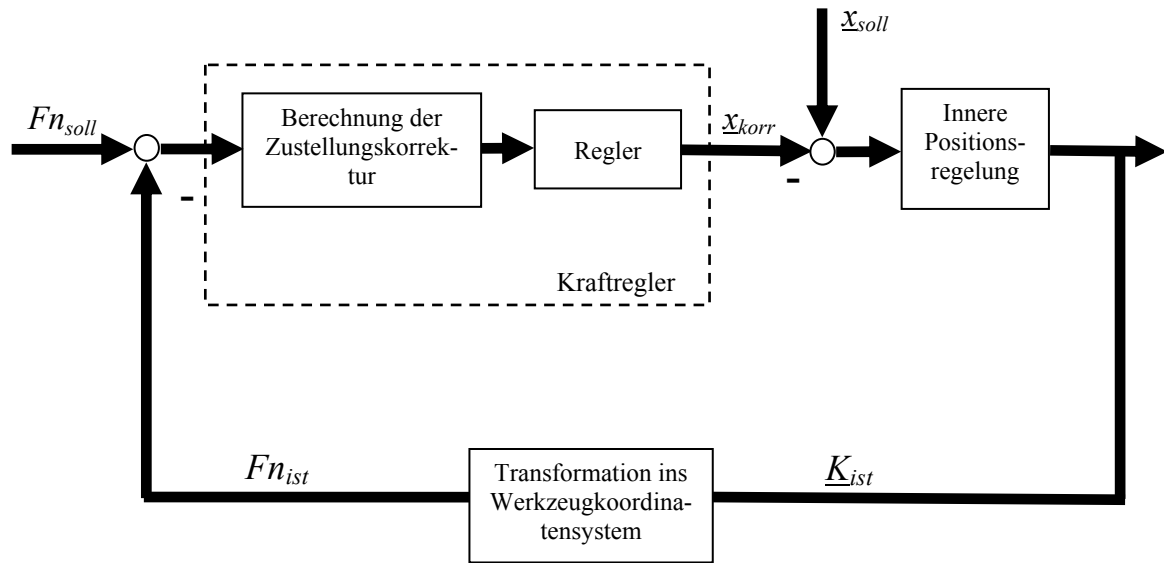


Abbildung 7.7: Paralleles Position-Kraft-Regelungsschema

Die Signale des Kraft-/Momentensensors (\underline{K}_{ist}) müssen für jede Taktzeit der Robotersteuerung ins Werkzeugkoordinatensystem transformiert werden, um den aktuellen Wert der Normalkraft ($F_{n_{ist}}$) zu erhalten. Dieser Wert wird dann mit dem Vorgabewert ($F_{n_{soll}}$) für die betrachtete Taktzeit, bzw. für den betrachteten Stützpunkt, verglichen. Aus der berechneten Abweichung wird die Korrektur der Schleifbahn in der Zustellungsrichtung bestimmt. Eine sichere Funktion des Kraftregelungskreises (nachgiebige Interaktion, kein Regelungsfehler, kein Flattern) ist durch die Wirkung eines geeigneten Reglers (z. B. Fuzzy-Regler) gewährleistet.

Eine sichere Kraft-Momenten-Regelung in mehreren Richtungen ist beim Schleifen noch immer nicht möglich, da bei dieser rechenintensiven Aufgabe die herkömmlichen Robotersteuerungen auf ihre Grenzen stoßen. Das führt zu einer unruhigen Bewegung des Roboters und zu einem schlechten Prozessergebnis. Die gemessenen Werte der Momente dienen zur Überwachung des Prozesses, wobei das Abfahren einer Bahn bei einer großen, durch einen unbekanntem Fehler verursachten Erhöhung der Momente unterbrochen wird. Eine Weiterentwicklung der Steuerungssysteme kann eine Kraftregelung in mehreren Richtungen ermöglichen. Damit wäre es möglich z. B. den Orientierungsfehler beim Greifen zu beseitigen, womit die Qualität des Prozesses weiter gesteigert würde.

7.2.5. Anwendbarkeit der Kraftregelung beim Schleifen der Werkstücke mit 2-fach gekrümmter Oberfläche

In diesem Abschnitt wird diskutiert, in welchem Maße eine Kraftregelung das Ergebnis der Bearbeitung von komplexen, 2-fach gekrümmten Oberflächen beeinflusst. Dabei wird der

Einfluss des Abtragsfehlers, der für eine Taktzeit der Kraftregelung des Roboters entsteht, auf der Oberflächenrauheit bei den verschiedenen Krümmungsradien bestimmt.

In einem ersten Schritt werden der Zustellungsfehler (Δx) in der Normalenrichtung und der Kippwinkelfehler (ΔW) in der Vorschubrichtung in einem Stützpunkt in Abhängigkeit von der Taktzeit (Δt), der Vorschubgeschwindigkeit (v_v) und des Krümmungsradius (R_z) berechnet. Die Berechnung erfolgt in der x-z Ebene (siehe Abbildung 7.8), wobei die Krümmung in der x-y Ebene später bei der Bestimmung des Andrucks- und des Normalenkraftfehlers berücksichtigt wird.

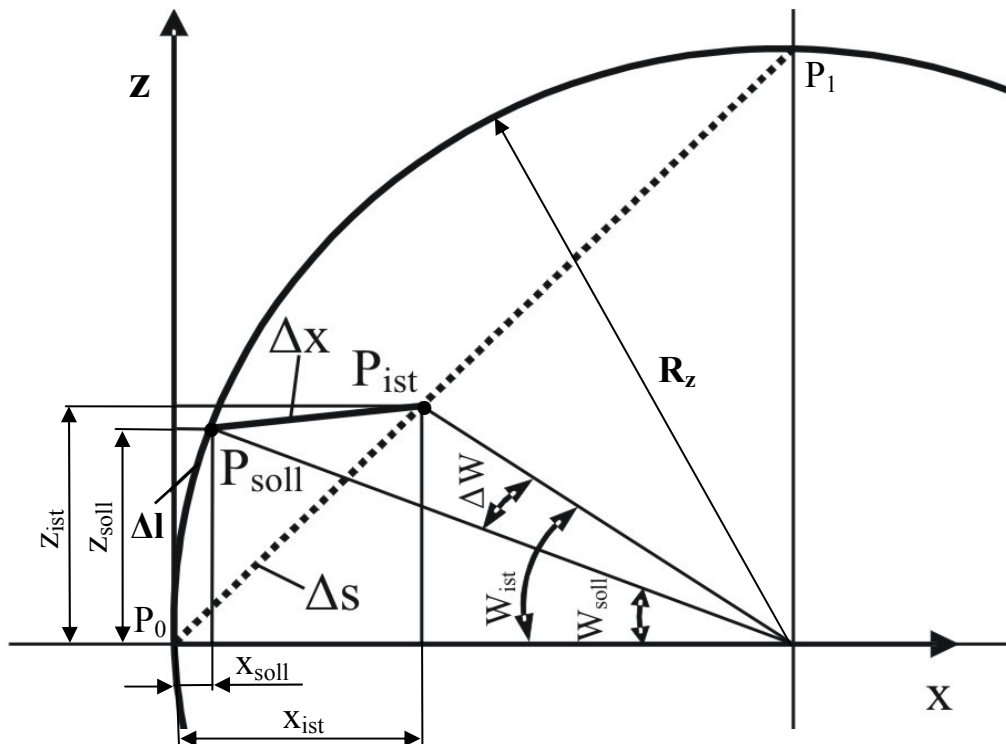


Abbildung 7.8: Berechnung des Zustellungs- und des Kippwinkelfehlers

Bei einer Taktzeit Δt kann die Robotersteuerung erst nach dem Ablauf dieses Zeitintervalls reagieren. Der Endeffektor befindet sich in Position P_{ist} und der Zustellungsfehler im Bezug auf die gewünschte Position P_{soll} beträgt Δx . Der Weg (Δs) des Endeffektors zwischen Anfangspunkt P_0 und Punkt P_{ist} ist:

$$\Delta s = v_v \cdot \Delta t \quad (\text{mm}) \quad (7.2)$$

Die Koordinaten des Punktes P_{ist} im x-z-Koordinatensystem (siehe Abbildung 7.8) sind:

$$x_{ist} = \Delta s \cdot \cos 45^\circ \quad (7.3)$$

$$z_{ist} = \Delta s \cdot \sin 45^\circ \quad (7.4)$$

wobei eine extreme Orientierungsdifferenz von 90° zwischen den Stützpunkten P_0 und P_1 betrachtet wird. Der Kippwinkel im Punkt P_{ist} ist:

$$W_{ist} = \arctg \frac{z_{ist}}{R_z - x_{ist}} \quad (^\circ) \quad (7.5)$$

Der Kippwinkel und die Koordinaten im Punkt P_{soll} sind:

$$W_{soll} = \frac{\Delta l \cdot 180^\circ}{R_z \cdot \pi} \quad (^\circ) \quad (7.6)$$

$$x_{soll} = R_z \cdot (1 - \cos W_{soll}) \quad (7.7)$$

$$z_{soll} = R_z \cdot \sin W_{soll} \quad (7.8)$$

wobei gilt:

$$\Delta l = \Delta s = v_v \cdot \Delta t \quad (7.9)$$

Der Zustellungs- und der Kippwinkelfehler werden dann berechnet als

$$\Delta x = \sqrt{(x_{ist} - x_{soll})^2 + (z_{ist} - z_{soll})^2} \quad (\text{mm}) \quad (7.10)$$

$$\Delta W = W_{ist} - W_{soll} \quad (^\circ) \quad (7.11)$$

In Tabelle 7.2 sind die Zustellungs- und die Kippwinkelfehler für verschiedene, praxisrelevante Werte der Taktzeit, der Vorschubgeschwindigkeit und des Krümmungsradius gegeben. Durch die Berechnungen konnten nahezu lineare Einflüsse der Taktzeit und der Vorschubgeschwindigkeit auf den Zustellungsfehler festgestellt werden. Im Gegensatz dazu beeinflusst der Krümmungsradius den Zustellungsfehler nicht signifikant. Im betrachteten Wertebereich konnte auch eine nahezu lineare Abhängigkeit des Kippwinkelfehlers von alle drei Faktoren beobachtet werden.

Δt (ms)	v_v (mm/s)	R_z (mm)	Δx (mm)	ΔW ($^\circ$)
0,5	30	10	0,01104949	0,01786402
5	30	10	0,11025225	0,18448651
0,5	60	10	0,02209359	0,03585723
5	60	10	0,21996606	0,38213786
0,5	30	100	0,01105192	0,0017806
5	30	100	0,11049494	0,01786402
0,5	60	100	0,02210331	0,00356248
5	60	100	0,22093592	0,03585723

Tabelle 7.2 Zustellungs- und Kippwinkelfehler für verschiedene Werte der Einflussfaktoren

Im nächsten Schritt wird der Einfluss des Zustellungsfehlers auf die Änderung des lokalen Andrucks (Δa_{lok}) in einem Stützpunkt mit Hilfe von FEM-Berechnungen (siehe Kapitel 4) für

verschiedene Krümmungen in der x-z und der y-z Ebene ermittelt. Die Berechnungen haben keinen signifikanten Einfluss der Krümmungsradien auf den lokalen Andruck in einem Stützpunkt gezeigt. Die Abhängigkeit des lokalen Andrucks in einem Stützpunkt (maximaler Andruck für eine Kontaktsituation) von der Zustellung für die betrachtete weiche Kontaktscheibe (siehe Abschnitt 4.2.2) ist in Abbildung 7.9 gegeben. Dabei werden die Veränderungen in einem für die Praxis relevanten Bereich der Zustellungen (0,6-1,2 mm) beobachtet.

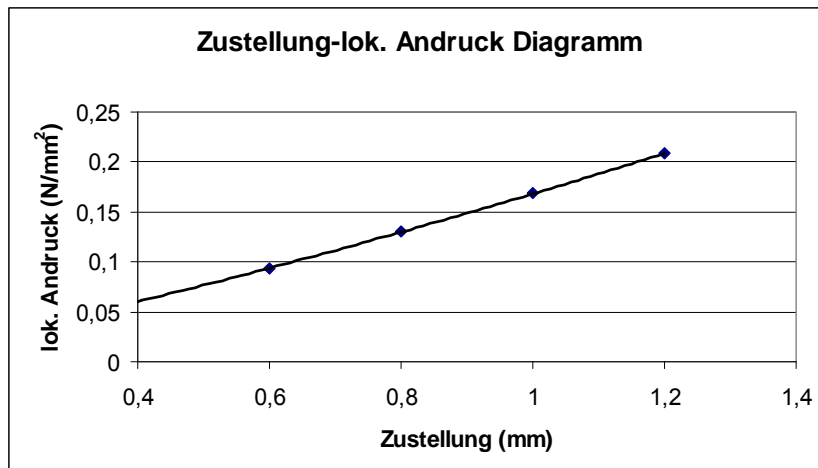


Abbildung 7.9: Abhängigkeit des lokalen Andrucks im Stützpunkt von der Zustellung

Der durch die FEM-Berechnungen ermittelte Zusammenhang aus der Abbildung 7.9 kann mit Hilfe eines Regressionspolynoms zweiten Grades approximiert werden in der Form:

$$q_{lok} = 0,0292 \cdot x^2 + 0,1389 \cdot x \quad (7.12)$$

Eine Veränderung der Zustellung von 1,0 mm auf 1,22 mm (im Fall: $\Delta t = 5$ ms, $v_v = 60$ mm/s) verursacht dabei eine Vergrößerung des lokalen Andrucks in einem Stützpunkt von:

$$\Delta q_{lok} = 0,042 \text{ N/mm}^2.$$

Der Abtragsfehler (Δa_{lok}) in einem Stützpunkt kann jetzt mit Hilfe des im Kapitel 6 entwickelten Modells (siehe Gleichungen 6.13-6.18) berechnet werden. Für die betrachtete Kontaktscheibe, Messing als Werkstoff des Werkstücks und der Bandkörnung P 100 beträgt der Abtragsfehler bei einer Schnittgeschwindigkeit von 30 m/s und bei der oben berechneten Vergrößerung des lokalen Andrucks (Δq_{lok}):

$$\Delta a_{lok} = 0,55 \text{ } \mu\text{m},$$

wobei die Taktzeit der Kraftregelung ($\Delta t = 5$ ms) als Schleifzeit (t_s) betrachtet wird. Dieser Fehler ist unter der Annahme berechnet, dass nach Ablauf eines Taktes der Kraftregelung (hier $\Delta t = 5$ ms) die aus der fehlerhaften Zustellung (1,22 mm statt 1,0 mm) resultierende Kraft- und damit Andruckdifferenz ausgeregelt worden ist.

Die Rauheitstiefe der Oberfläche nach einem Schleifprozess liegt normalerweise im Bereich 1-30 μm [KK96]. Da der Abtragsfehler im Nanometerbereich liegt, kann festgestellt werden, dass für die oben genannten Bedingungen (u. a. Krümmungsradien über 10 mm, Taktzeiten unter 5 ms) die Kraftregelung keine negative Auswirkung auf das Prozessergebnis hat. Durch den Einsatz der Kraftregelung wird sogar erreicht, dass durch die „schnelle Kompensation“ von Zustellungsfehlern das Maß an fehlerhaftem Abtrag reduziert wird.

Ein weiterer Beschränkungsfaktor bei der Kraftregelung ist die Genauigkeit des Sensors (z. B. Messbereich 0-660 N, Auflösung 0,5 N), der für die Kraftmessung eingesetzt wird. Um den Einfluss dieses Faktors auf das Prozessergebnis zu untersuchen, werden die mit Hilfe der FEM-Berechnungen aufgestellten Zustellung-Kraft Diagramme aus dem Kapitel 4 (siehe Abbildungen 4.11 und 4.14) genutzt. In Abbildung 7.10 wird die Abhängigkeit der integralen Normalenkraft von der Zustellung für verschiedene charakteristische Krümmungsradien dargestellt. Die Breite der zylindrischen Werkstücke ($R_y = \infty$) beträgt dabei $B = 50$ mm.

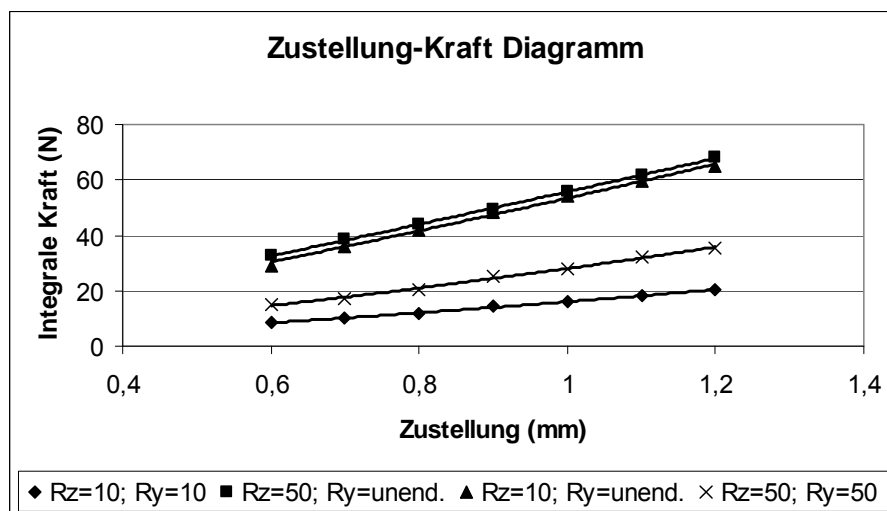


Abbildung 7.10 Zustellung-Kraft Diagramm

Ähnlich wie beim Zustellung-Andruck Diagramm können die Abhängigkeiten der Normalenkraft von der Zustellung für verschiedene Krümmungsradien durch die Polynome zweiten Grades approximiert werden. Auf diese Art und Weise kann der Zustellungsfehler, der durch den Messfehler des Kraftsensors verursacht wird, bestimmt werden. So entsteht z. B. bei den Bedingungen

- Auflösung des Kraftsensors: 0,5 N,
- Krümmungsradien: $R_y = R_z = 10$ mm und
- Bereich der Zustellungen: 1 mm

ein Zustellungsfehler $\Delta x=0,03$ mm, der deutlich kleiner als der vorher betrachtete geometrische Zustellungsfehler ist und das Prozessergebnis noch weniger beeinflusst.

Bei einer Krümmung in einer Richtung ($R_y=\infty$, $R_z=10$ mm, zylindrische Werkstücke, $B=50$ mm) beträgt der Zustellungsfehler $\Delta x=0,01$ mm. Da die integrale Normalenkraft linear von der Werkstückbreite abhängig ist, vergrößert sich dementsprechend der Zustellungsfehler bei einer Verkleinerung der Werkstückbreite. So beträgt er bei $B=2$ mm im oben betrachteten Fall $\Delta x=0,25$ mm. Dieser Fehler, zusammen mit dem geometrischen Zustellungsfehler, verursacht einen Abtragsfehler, der schon im Mikrometerbereich liegt (oben: 0,22 mm führt zu 55 μm) und wird als Grenzfall für die Anwendbarkeit der Kraftregelung beim Bandschleifen gekrümmter Oberflächen angenommen. Die Krümmungen mit Radien, die unter 10 mm liegen, werden hier nicht betrachtet, da die Roboterantriebe wegen großer Umorientierungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich sehr schnell an ihre Grenzen stoßen.

7.2.6. Kraftregelung beim Bandschleifen eines realen Werkstücks mit komplexer Geometrie der Oberfläche

Die Möglichkeit und die Vorteile des Einsatzes eines Kraftregelungssystems beim Bandschleifen komplexer Werkstücke werden am Beispiel der im Kapitel 3.4 dargestellten Sanitärarmatur erläutert. Die Geometrie und die wichtigsten Krümmungsradien der Sanitärarmatur vom Typ „Eurodisc“ sind in Abbildung 7.11 gegeben.

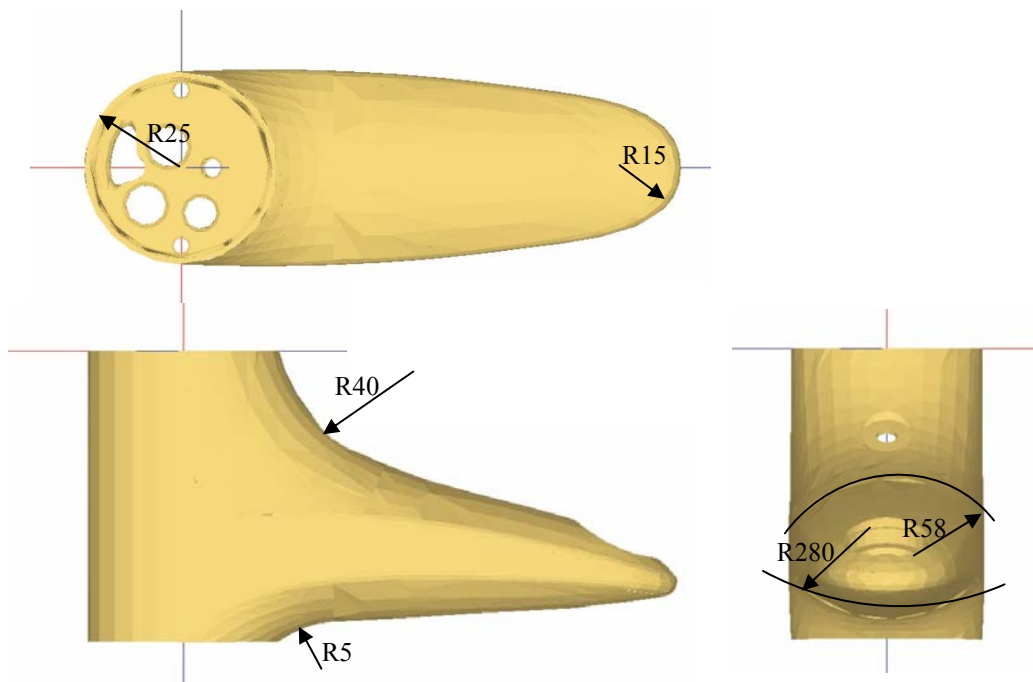


Abbildung 7.11: Hauptkrümmungen der Sanitärarmatur „Eurodisc“

In der Prozessvorplanung werden die Bereiche definiert, die die Teile der Oberfläche mit einer nahezu konstanten Krümmung beinhalten. So werden an der Oberfläche des betrachteten Werkstücks 7 Bereiche definiert (siehe Abbildung 7.12). Bei der Bearbeitung wird jedem dieser Bereiche eine Schleifbahn zugewiesen.

Die Krümmungsanalyse hat gezeigt, dass bis auf Bereich III (siehe Abbildung 7.12) alle Teile der Oberfläche Krümmungen aufweisen, deren Radien über der kritischen Grenze von 10 mm liegen.

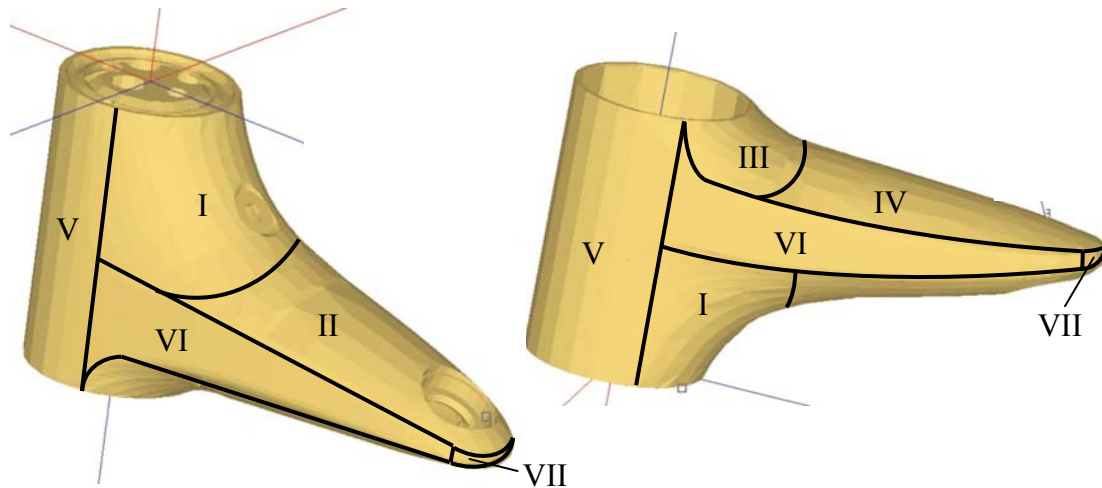


Abbildung 7.12: Teilbereiche der Werkstückoberfläche mit nahezu konstanter Krümmung

Im Bereich III wird außerdem am Rand der Kontaktscheibe geschliffen, um die gewünschte Kontur zu erzeugen. Die Zustellungsrichtung unterscheidet sich dabei von der Normalenrichtung. Deshalb sollte in diesem Bereich auf eine Kraftführung des Prozesses verzichtet werden. Bereich I eignet sich mit seinen Krümmungen für eine Kraftführung, aber wegen des sehr komplexen Übergangs zum Bereich II wird auch in diesem Bereich die weggeführte Variante bevorzugt. Der Bereich VI kann nicht mit einer konstanten Normalenkraft geschliffen werden, da sich die Größe der Fläche entlang der Schleifbahn in diesem Bereich ändert.

Alle andere Bereiche (II, IV, V, VII) sind für eine Kraftführung des Prozesses geeignet. Kritisch dabei ist der Bereich VII mit einem Krümmungsradius $R_z=15$ mm und der Breite $B=8$ mm, aber die Berechnungen aus dem Abschnitt 7.2.5 haben gezeigt, dass sich eine Kraftregelung in diesem Fall auf das Prozessergebnis nicht negativ auswirkt.

Wie schon erwähnt, verringert eine Kraftregelung beim Bandschleifen die Anzahl der Stützpunkte auf der Werkstückoberfläche, wodurch die Zeit für das „Nachteachen“ erspart werden kann. So reduziert sich z. B. die Anzahl der Stützpunkte im Bereich II von 36 auf 18 (siehe Abbildung 7.13).

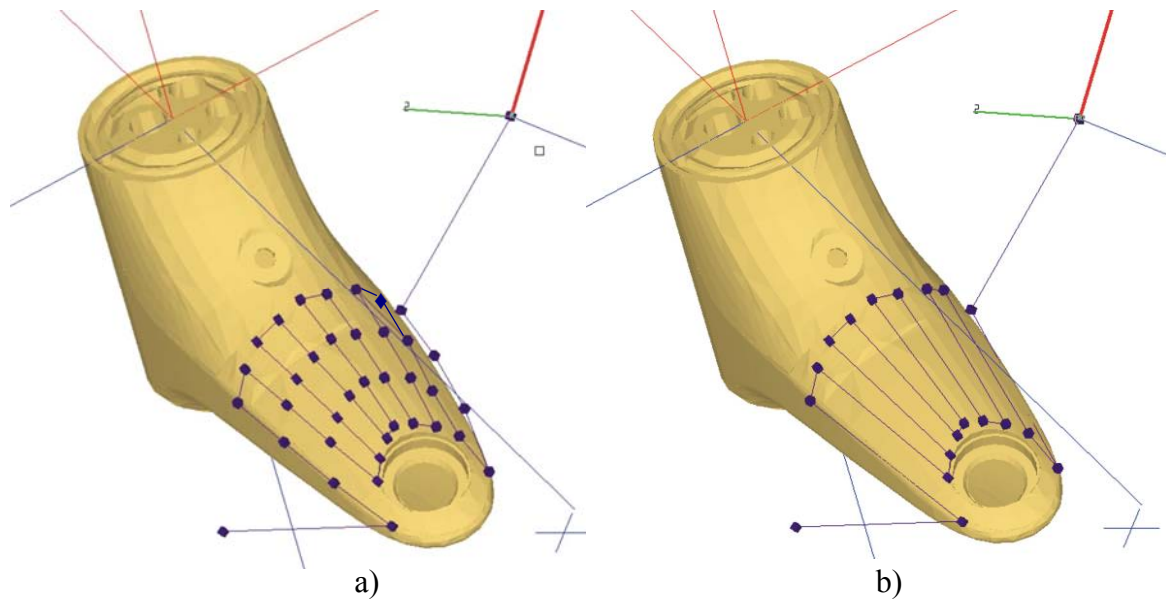


Abbildung 7.13: Schleifbahnen und Stützpunkte bei a) Wegführung und b) Kraftführung

Die Anzahl der Stützpunkte für beide Prozessvarianten ist in Tabelle 7.3 gegeben.

Bereich	Geeignet für die Kraftführung	Anzahl der Stützpunkte	
		kraftgeführt	weggeführt
I	nein	19	19
II	ja	18	36
III	nein	13	13
IV	ja	2	13
V	ja	3	17
VI	nein	20	20
VII	ja	3	7
Total:		78	125

Tabelle 7.3: Anzahl der Stützpunkte bei der kraft- und der weggeführten Prozessvariante

Tabelle 7.3 zeigt, dass sich die Anzahl der Stützpunkte bei der Integration der Kraftregelung um fast 40% verringert, was zu einer großen Zeitersparnis beim Justieren des Prozesses führt. Zusätzlich wird das Prozessergebnis durch eine bessere Anpassung des Werkzeugs an die Werkstückoberfläche bei einer Kraftführung verbessert. Eine Erweiterung des Einsatzes der Kraftregelung beim industrierobotergetriebenen Bandschleifen wird dabei durch die Neuentwicklungen in den Bereichen der Robotersteuerung (kürzere Taktzeiten des Regelkreises) und der Sensorik (höhere Genauigkeit der Kraftmessung) ermöglicht.

7.3. Ein Konzept zur Anwendung der Prozesssimulation beim Nachschleifen von Werkstücken mit fehlerhafter Oberfläche

Wie schon im Abschnitt 3.4 erwähnt, werden moderne Industrieroboter bei der Nachbearbeitung von Werkstücken mit fehlerhafter Oberfläche eingesetzt. Die Beseitigung der Oberflächenfehler erfolgt dabei in der ersten Phase des Nachbearbeitungsprozesses, durch das Nachschleifen mit einem gröberen Schleifband. Es ist oft der Fall, dass wegen der falschen Wahl der Prozessparameter die Fehler nur teilweise beseitigt werden. Deshalb wird zurzeit ein Konzept zur automatischen Bestimmung der Zustellung entwickelt, das eine fehlerfreie Nachbearbeitung der Werkstücke ermöglicht.

Der Ausgangspunkt dieses Konzepts ist ein präziser Abstandsensor, der die Information über die Fehlertiefe für die Berechnung der Zustellung bereitstellt. Die zu erzielende Abtragstiefe an der fehlerhaften Stelle des Werkstücks wird durch Multiplikation der Fehlertiefe mit einem Sicherheitsfaktor bestimmt. Mit Hilfe der inversen Prozesssimulation wird dann anhand der anderen Prozessparameter die Zustellung für das Nachschleifen ermittelt (siehe Abbildung 7.14)

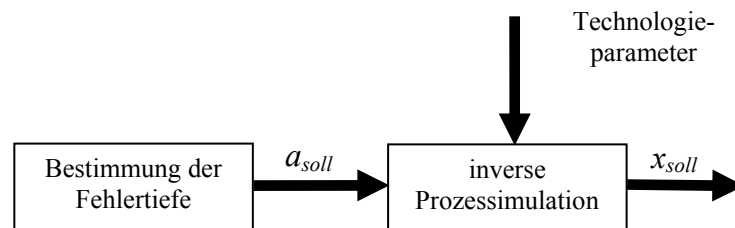


Abbildung 7.14: Berechnung der Zustellung für das Nachschleifen von fehlerhaften Werkstücken

Eine präzise Prozesssimulation ist auch hier die Voraussetzung für eine sichere Funktion des Nachbearbeitungssystems.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Wegen einer guten Anpassung des elastischen Werkzeugs an die Werkstückoberfläche wird das industrierobotergetriebene Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe sehr oft für die Feinbearbeitung von frei geformten Oberflächen benutzt. Der ständig wachsende Bedarf an verschiedenen Produkten mit frei geformten Oberflächen erfordert eine Erhöhung der Produktivität und der Flexibilität von automatisierten Anlagen für die Feinbearbeitung dieser Produkte. Deshalb wird ein neues Softwaresystem entwickelt, das die Erstellung und Optimierung von Roboterprogrammen bei anspruchsvollen Bearbeitungsprozessen erleichtert. Ein solches Softwaresystem fordert aber ein präzises Prozessmodell, dessen Bildung beim Bandschleifen von frei geformten Oberflächen wegen der komplizierten Kontaktverhältnisse zwischen Werkzeug und Werkstück sehr aufwendig ist. In dieser Arbeit wurde ein Modell für das Bandschleifen mit elastischer Kontaktscheibe erstellt, das die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf das Schleifergebnis beschreibt und quantifiziert.

Dazu wurde zunächst ein vorhandenes FEM-Andruckverteilungsmodell experimentell, auf Basis von zylindrischen Werkstücken anhand der integralen Andruckkraft kalibriert. Durch die Variation der Elastizitätskenngrößen (Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl ν) werden die FEM-Berechnungen an die Versuchsergebnisse angepasst. Auf diese Art und Weise wurde das FEM-Modell quantifiziert und ein Zusammenhang mit der Realität hergestellt.

In der Verifikation konnte eine gute Übereinstimmung der mit Hilfe von FEM berechneten integralen Kräfte mit den im Versuch gemessenen Kräften im Bereich der mittleren Zustellungen (0,5 mm) beobachtet werden. Der mittlere Bereich ist auch der wichtigste Bereich, da die Zustellungswerte in der Praxis meistens zwischen 0,3 mm und 1 mm liegen. Den größten Relativfehler zeigt das FEM-Modell im Bereich der großen Zustellungen (1,5 mm) und der großen Krümmungsradien. Dieser Fehler wird durch die Idealisierung der elastischen Kontaktscheibe erklärt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das vorhandene FEM-Modell hinsichtlich der integralen Kraft für die Berechnungen im Bereich der mittleren Zustellungen geeignet ist. Um die Genauigkeit des FEM-Modells zu erhöhen und seine Anwendbarkeit auf den Bereich der größeren Zustellungen zu erweitern, müsste das Modell durch die Integration der Reibungskräfte erweitert werden.

Nach der Bestimmung der unbekanntenen elastischen Werkstoffkenngrößen erfolgte die Modellierung der lokalen Zusammenhänge, die die Einflüsse der Prozessparameter auf den lokalen Abtrag beschreiben, wobei von einer konstanten Andruckverteilung an der Werkstückoberfläche ausgegangen wurde.

Als die wichtigsten Störgrößen für das Modell der lokalen Zusammenhänge wurden Bandverschleiß, Wärmeeintrag, Messsystemungenauigkeit und Andruckkraftschwankungen erkannt. Die Voraussetzung für ein präzises Modell ist eine Minimierung der Einflüsse dieser Störgrößen.

Der zunehmende Verschleiß des Schleifbandes verursacht die Absenkung des Zeitspanvolumens über die Nutzungsdauer eines Bandes. Durch einen häufigen Austausch der Schleifbänder wurde der Einfluss des Bandverschleißes bei den Modellierungsversuchen minimiert. Um den Einfluss des Bandverschleißes in die Schleifmodelle einzuschließen, wurde ein Bandverschleißfaktor eingeführt, der den Verschleißzustand des Bandes beschreibt. In Bezug auf den Verschleißfaktor wird der Abtrag während der Bandstandzeit durch eine Anpassung der Technologieparameter (Erhöhung der Andruckkraft oder Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit) ausgeglichen. Der Einsatz neuentwickelter verschleißfester Bänder könnte die Prozessmodellierung allerdings erleichtern, da der Einfluss des Verschleißes als entscheidende Störgröße minimiert wird bzw. vernachlässigt werden kann.

Ein direkter Einfluss der Temperatur auf den Abtrag konnte nicht festgestellt werden. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass sich ein hoher Wärmeeintrag beim Bandschleifen negativ auf die Werkstückoberfläche auswirkt. Eine deutliche Veränderung der Oberfläche wurde beim Schleifen von Baustahl schon bei einer Schleiftemperatur von 200°C festgestellt. Im Gegensatz treten beim Messing und hochlegierten Stählen erste sichtbare Veränderungen der

Oberfläche erst ab 500°C auf. Daher können diese Werkstoffe mit einem höheren Zeitspanvolumen geschliffen werden, was zu einer Erhöhung der Produktivität führt.

Durch Integration eines zusätzlichen Referenzmesssystems und Erhöhung der Steifigkeit der Werkstückhalterung können die Einflüsse des Messsystems und der Andruckkraftschwankungen auf die Prozessergebnisse minimiert werden, wobei für die Modellierung des Prozesses brauchbare Versuchsergebnisse entstehen.

Für die Modellierung der lokalen Zusammenhänge wurden die statistischen Versuchspläne verwendet, bei denen mehrere Faktoren von einem zum anderen Einzelversuch gleichzeitig variiert wurden.

Bei der Auswertung der durchgeführten Versuchsserie wurde festgestellt, dass die Eingangsgrößen „Kontaktlänge“ und „Radius der Kontaktrolle“ nur die Andruckverteilung an der Werkstückoberfläche beeinflussen und keinen Einfluss auf der lokalen Ebene haben. Außerdem zeigen die Versuche, dass die Bandspannung im ausgewählten Wertebereich keinen signifikanten Einfluss auf den Abtrag aufweist. Deshalb ist die Bandspannung im Bearbeitungsprozess so einzustellen, dass eine ruhige und sichere Funktion der Schleifanlage ohne Vibrationen und Gefahr des Schleifbandbruchs gewährleistet ist.

Das Modell zeigt eine Wechselwirkung zwischen den Einflussgrößen „lokaler Andruck“, „Körnung des Schleifbandes“ und „Werkstoff des Werkstücks“, d. h. der Effekt des Andrucks auf den Abtrag hängt von der Körnung des Schleifbandes und dem Werkstoff des Werkstücks ab. Den stärkeren Effekt des lokalen Andrucks auf den lokalen Abtrag bei gröberen Körnungen des Schleifbandes und bei härteren Werkstoffen kann man durch verschiedene Widerstände bei der Eindringung der Körner in das Werkstück beim gleichen Wert des Andrucks erklären. Weiterhin konnte ein linearer Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und der Schleifzeit auf den Abtrag bei der durchgeführten Versuchsserie festgestellt werden. Eine hohe Genauigkeit des Modells der lokalen Zusammenhänge konnte durch die Verifikationsversuche bestätigt werden.

Das entwickelte Modell findet seine wichtigste Anwendung bei der Simulation des Bandschleifens mit elastischer Kontaktscheibe. Dabei zeigte die Verifikation der Simulation, dass eine Erweiterung des Prozessmodells durch eine Integration der dynamischen Effekte und eine Berücksichtigung der Übergangsprozesse bei den Ein- und Ausfahrbewegungen des Roboters notwendig sind, um eine hochpräzise Prozesssimulation zu erhalten.

Weitere wichtige Anwendungen findet das erhaltene Prozessmodell bei der Kraftregelung des Roboters in einer automatisierten Bandschleifzelle und der Bestimmung der Prozessparameter beim Nachschleifen zur Korrektur der Fehler an der Werkstückoberfläche. Eine Anwendbar-

keitsanalyse hat dabei gezeigt, dass durch die Neuentwicklungen im Bereich der Steuerungs- und der Messtechnik (kürzere Ausregelzeiten, höhere Präzision) und durch den Einsatz des entwickelten Prozessmodells bei der Kraftregelung des Roboters eine deutliche Verbesserung des Prozessergebnisses beim Bandschleifen komplexer Werkstücke ermöglicht wird.

Literaturverzeichnis

- [3M] 3M Deutschland GmbH: Produktinformationen: 3M Trizact Feinschleifmittel, Online im Internet verfügbar unter:
<http://cms.3m.com/cms/GB/en/2-110/iFikcFL/viewimage.jhtml>
- [ABB] ABB Flexible Automation: Produktinformationen Industrieroboter, Online im Internet verfügbar unter:
<http://www.abb.com/product/ge/9AAC100735.aspx?country=DE>
- [ABB98a] ABB Flexible Automation: IRB 4400 Handbücher-Produktbandbuch, 1998
- [ABB98b] ABB Flexible Automation: IRB 4400 Handbücher-Rapid Referenzbandbuch, 1998
- [Ahn03] Ahn, J.: Dynamic Frictionless Contact Problems with Linearly Elastic Bodies. Dissertation, University of Iowa, 2003
- [All94] Alldieck, J.: Simulation des dynamischen Schleifprozesses. Dissertation, TH Aachen, 1994
- [ATI] ATI Industrial Automation: Produktinformationen: 6-Axis Kraft-/Momentensensor, Online im Internet verfügbar unter:
<http://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx>
- [AUT] AUTOCAM Informationstechnik GmbH: Produktinformationen: Moses, Online im Internet verfügbar unter: <http://www.autocam.de/Moses.html>
- [Bri97] Brinksmeier, E.: Vermeidung thermischer Werkstückbeeinflussung beim Schleifen. Wirtschaftliche Schleifverfahren - Stand und Entwicklungstendenzen in der Schleiftechnik, Band 2, S. 1-29, 1997
- [Buc90] Buchholz, W.: Einfluss von Kühlschmiermitteln auf den Bandschleifprozess. Industrie Anzeiger, Band 112 Heft 44, S. 38-39, 1990

- [Bur91] Burkart, W.: Handbuch für das Schleifen und Polieren. 6. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, 1991
- [Car] Carat Robotic Innovation GmbH: Produktinformationen: FAMOS, Online im Internet verfügbar unter: <http://www.famos-robotic.de>
- [CDF02] Chen, X.; Devanathan, R.; Fong, A.M.: Advanced Automation Techniques in Adaptive Material Processing. World Scientific Publishing, 2002
- [CK05] Cabaravdic, M.; Kuhlenkötter, B.: Bandschleifprozesse optimieren. *mo Metalloberfläche*, 4/2005, S. 44-47, 2005
- [CK06] Cabaravdic, M.; Kuhlenkötter, B.; Busch, A.: Effizient Roboter gestützt Bandschleifen. *mo Metalloberfläche*, 1-2/2006, S. 30-32, 2006
- [CK+03] Cabaravdic, M.; Kneupner, K.; Kuhlenkötter, B.; Kreis, W.; Schüppstuhl, T.; Zhang, X.: Belt Grinding Models for Sculptured Surfaces. Simulation Aided Offline Process Design and Optimization in Manufacturing Sculptured Surfaces, Universität Dortmund, 2003
- [CK+04] Cabaravdic, M.; Kneupner, K.; Kuhlenkötter, B.; Schröder, A.: Force - Distribution Model by the Belt Grinding with Elastic Contact Wheel. TMT2004, Universität Sarajevo, Bosnien-Herzegovina, 2004
- [CKK03] Cabaravdic, M.; Kneupner, K.; Kuhlenkötter, B.: Methods for efficient optimization of robot supported grinding and polishing processes. TMT 2003, Universität Barcelona, Spanien, 2003
- [Cra05] Craig, J.: Introduction to Robotics (Mechanics and Control). 3. edition, Pearson Prentice Hall, 2005
- [DB89] Dennis, P.; Buchholz, W.: Schnelle Schleifbänder – Kornverschleißminderung beim Hochleistungsbandschleifen. *tz für Metallbearbeitung*, 83 (1989) 9, S. 81-85, 1989
- [Ded72] Dederichs, M.: Untersuchung der Wärmebeeinflussung des Werkstückes beim Flachsleifen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1972
- [Deg81] Degenhardt, H.: Akustische Untersuchungen zum Bandschleifen an Kontaktscheiben. Dissertation, Universität Hannover, 1981
- [Del] DELMIA GmbH: Produktinformationen: IGRIP, Online im Internet verfügbar unter: http://www.delmia.com/gallery/pdf/DELMIA_IGRIP.pdf
- [Den88] Dennis, P.: Einfluss der Kornart auf den Hochleistungsbandschleifprozess. *Industrie Anzeiger*, Band 110 Heft 73, S. 62-63, 1988

- [DIN6344] DIN ISO 6344: Schleifmittel auf Unterlagen - Korngrößenanalyse. Hrsg. Deutsches Institut für Normung, 2000
- [DIN8589] DIN 8589 Teil 12: Bandschleifen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Hrsg. Deutsches Institut für Normung, 1985
- [DLB03] Denkena, B.; Lütjens, G.; Böß, V.: Feinbearbeitung von Werkzeugen und Formen. Automatisiertes Schleifen und Bandschleifen von Freiformflächen im Praxiseinsatz. wt Werkstattstechnik online, Band 93 Heft 11/12, S. 729-734, 2003
- [EFR] EF-Robotertechnik GmbH: Produktinformationen: COSIMIR, Online im Internet verfügbar unter: <http://www.cosimir.com>
- [Fol93] Folkerts, W.: Dynamische Prozesskennwerte des Schleifens und deren Einfluss auf das Prozessverhalten. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1993
- [Fro92] Fromlowitz, J.: Standzeiten und Temperaturen beim Hochleistungsbandschleifen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1992
- [Fro01] Fromlowitz, J.: Schneller, schärfer, zäher ... Sol-Gel-Korund für Hochleistungsschleifprozesse. mo Metalloberfläche, Band 55 Heft 8, S. 16-20, 2001
- [FRS01] Freund, E.; Rossmann, J.; Stern, O.: Skriptum zur Vorlesung Robotertechnologie I und II. Institut für Roboterforschung, Universität Dortmund, 2001
- [FS01] Fritz, H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. 5. Auflage, Springer-Verlag, 2001
- [Geh93] Gehring, V.: Numerisch gesteuertes Formschleifen von gekrümmten Werkstückoberflächen. Dissertation, Universität Hannover, 1993
- [Gru91] Grube, G.: Schleifen mit Industrierobotern – Freiformflächen. Dissertation, Universität Dortmund, 1991
- [GSF97] Gorinevsky, D.; Schneider, A.; Formalsky, A.: Force Control of Robotics Systems. CRC Press LCC, 1997
- [GZ+00] Guo, Y.; Zheng, X.; Chen, B.; Liang, X.; Katsuo, S.; Tsunemoto, K.: Study on a new type of throw-away soft grinding wheels. Chinese Journal of Mechanical Engineering. English Edition, Band 13 Heft 2, S. 140-144, 2000
- [Ham98] Hamann, G.: Modellierung des Abtragsverhaltens elastischer robotergeführter Schleifwerkzeuge. Dissertation, Universität Stuttgart, 1998

- [Her] Hermes Schleifmittel GmbH & Co. KG: Produktinformationen: Schleifbänder, Online im Internet verfügbar unter:
http://www.hermes-abrasives.com/lang07/pages/produkte_a_frameset.htm
- [Het84] Hetz, F.: Randzonenbeeinflussung durch Schleifen - Wesentliche Einflussgrößen des Prozesses. 6. Oberflächenkolloquium, TH Karl-Marx-Stadt und Kammer der Technik, S. 281-288, 1984
- [Hin85] Hinzmann, G.: Prozess- und Geräuschverhalten von flexiblen Schleifmitteln. Dissertation, Universität Hannover, 1985
- [Kem] Gert Kemper GmbH: Produktinformationen: Kontaktscheiben, Online im Internet verfügbar unter:
<http://www.kemperkontakt.de/Kontaktscheiben.425.0.html?&L=3>
- [KF90] König, W.; Fromlowitz, J.: Kalt ohne Kühlung. Schnittkraft und Schleifwärme sind gleichwertige Verschleißkriterien beim Hochleistungsbandschleifen. Der Maschinenmarkt, Band 96 Heft 38, S. 42-44, 1990
- [KHL77] Koenig, W.; Hoenscheid, W.; Lowin, R.: Untersuchung der beim Schleifprozess entstehenden Temperaturen und ihre Auswirkungen auf das Arbeitsergebnis. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, 1977
- [Kle03] Klein, B.: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode. Frieder. 6. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, 2003
- [Kle01] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Carl Hanser Verlag, 2001
- [Kne04] Kneupner, K.: Entwicklung eines Programmier- und Steuerungskonzepts für Robotersysteme auf der Basis eines Umweltmodells. Dissertation, Universität Dortmund, 2004
- [KK96] König, W.; Klocke, F.: Fertigungsverfahren Band 2 - Schleifen, Honen, Läppen. VDI Verlag, 1996
- [KK01] Kneupner, K.; Kreis, W.: Simulation des Bandschleifprozesses. Frontiers in Simulation, Band 8, S. 517-522, 2001
- [KKS05] Krewet, C.; Kuhlenkötter, B.; Schüppstuhl, T.: Optimierung robotergestützter Fertigungsprozesse. Effiziente Optimierung von Bearbeitungsprogrammen für komplexe Werkstückgeometrien. wt Werkstattstechnik online, Band 95 Heft 3, S. 108-112, 2005
- [KO88] Kikuchi, N.; Oden, J.T.: Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods, Studies in Applied Mathematics 8, SIAM, 1988

- [Kra01] Krause, R.H.: Monotone Mehrgitterverfahren für Signorini's Problem mit Reibung. Dissertation, TU Berlin, 2001
- [KSK00] Kreis, W.; Schüppstuhl, T.; Kneupner, K.: Den Bandschleifprozess automatisieren – Prozessplanung und -optimierung bei der Bearbeitung von Freiformflächen. *mo Metalloberfläche*, 4/2000, S. 12-15, 2000
- [Kro94] Krottmaier, J.: Versuchsplanung – Ein integraler Bestandteil der TQM-Strategie. Verlag TÜV Rheinland, 1994
- [Kuk01] Kuka Roboter GmbH: KR 15-Handbücher: Programmierung Experte, 2001.
- [Lin06] Lindenau, K.: Wirtschaftliche Fertigung mit Schleifen. Hanser Verlag, 2006
- [Low80] Lowin, R.: Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1980
- [Mal92] Malkin, S.: Grinding temperatures and thermal damage. *Thermomechanical Aspects of Manufacturing and Materials Processing*, S. 271-280, 1992
- [Mey98] Meyerhoff, M.: NC-Programmierung für das kraftgesteuerte Bandschleifen von Freiformflächen. Dissertation, Universität Hannover, 1998
- [Mic99] Michel, S.: Entwicklung einer kraftgeregelten Bandfinishingtechnologie für die Präzisionsbearbeitung von Schwermaschinenbauteilen, Vulkan Verlag, 1999
- [Mul01] Mullins, P.: Adaptive machining to improve blade repair. *Diesel and Gas Turbine Worldwide*, Band 33 Heft 7, S. 78-79, 2001
- [Nat03] Natale, C.: *Interaction Control of Robot Manipulators*. Springer-Verlag, 2003
- [Orf01] Orf, N.: Optimization of coated abrasive grinding performance. *Incast*, Band 14 Heft 7, S. 14-19, 2001
- [Ost94] Osterhaus, G.: Verfahrenübergreifende Simulation und Auslegung von Schleifprozessen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1994
- [Ost00] Osterrath, H.: Bandschleifen 2000 – Der Stand der Anwendungen des Bandschleifens zu Beginn des 21 Jahrhunderts, expert-Verlag, 2000
- [Pac95] Pachur, G.: Beitrag zur Prozessqualitätssteigerung beim Bandschleifen mit Industrierobotern. Dissertation, Universität Dortmund, 1995
- [Pau96] Paucksch, E.: *Zerspantechnik*. 5. Auflage, Vieweg & Son Verlag, 1996
- [Pet91] Petersen, H.: *Grundlagen der statistischen Versuchsplanung*, Ecomed Verlagsgesellschaft, 1991

- [Pic] Friedrich August Picard GmbH & Co. KG: Produktinformationen: Kontaktscheiben, Online im Internet verfügbar unter: <http://www.picard-kg.de/kontaktscheiben.htm>
- [RKM06] Ren, X.; Kuhlenkötte, B.; Müller, H.: Simulation and verification of belt grinding with industrial robots. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Band 46, S. 708-716, 2006
- [Rok99] Rokossa, D.: Offline-Programmierung von Industrierobotern. Dissertation, Universität Dortmund, 1999
- [Ruc] RU.CO.S: Produktinformationen: Kontaktscheiben, Online im Internet verfügbar unter: http://www.rucos.it/english/PRODOTTO_ing.htm
- [Sch95] Schauer, U.: Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1995
- [Sch03] Schüppstuhl, T.: Beitrag zum Bandschleifen komplexer Freiformgeometrien mit dem Industrieroboter. Dissertation, Universität Dortmund, 2003
- [Sha88] Shaw, M.C.: The importance of temperature in grinding. Journal of Mechanical Working Technology, Band 17, S. 343-355, 1988
- [Sig33] Signorini, A.: Sopra alcune questioni di elastostatica. Attil della Societa Italiana per il Progresso delle Scienze, 1933
- [SM97] Spur, G.; Meier, A.: Schleifbearbeitung von Gasturbinenwerkstoffen. Wirtschaftliche Schleifverfahren - Stand und Entwicklungstendenzen in der Schleiftechnik, Band 1, S. 1-30, 1997
- [SS96] Sciavicco, L.; Siciliano, B.: Modeling and Control of Robot Manipulators. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996
- [SV99] Siciliano, B.; Villani, L.: Robot Force Control. Kluwer Academic Publishers, 1999
- [Tim90] Timmermann, S.: Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1990
- [TB02] Tönshoff, H.K.; Böß, V.: Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Internat. Conf., Band 12, S. 289-294, 2002
- [TBU01] Tönshoff, H.K.; Böß, V.; Urban, B.: Automatisiertes Schleifen von Hohlformen. wt Werkstattstechnik online, Band 91 Heft 7, S. 422-427, 2001
- [TD88] Tönshoff, H.K.; Dennis, P.: Hochleistungsschleifen - ein massgebendes Verfahren. wt Werkstattstechnik - Zeitschrift für Industrielle Fertigung, Band 78 Heft 12, S. 665-669, 1988

- [TD04] Tönshoff, H.K.; Denkena, B.: Spanen - Grundlagen. 2. Auflage, Springer-Verlag, 2004
- [TD+02] Tönshoff, H.K.; Denkena, B.; Böß, V.; Urban, B.: Reduction of manual finishing in die and mould manufacturing. Internat. Conf. on Manufacturing Engineering, Band 1, S. 75-83, 2002
- [Tec] Tecnomatix Technologies Ltd: Produktinformationen: eM-Workplace (ehemals: ROBCAD), Online im Internet verfügbar unter:
<http://www.tecnomatix.de>
- [TH83] Tönshoff, H.K.; Hinzmann, G.: Einflussgrößen beim Bandschleifen an Kontaktscheiben. Stahl und Eisen, 103/7, S. 337-340, 1983
- [Uhl97] Uhlmann, E.: Schleifmittel auf Unterlage - Hochleistungswerkzeuge für die Feinbearbeitung. Wirtschaftliche Schleifverfahren - Stand und Entwicklungstendenzen in der Schleiftechnik, Band 2, S. 1-28, 1997
- [VDI1601] VDI-Berichte 1601: Sichere Handhabung brennbarer Stäube, Hrsg. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, 2001
- [VDI3396] VDI-Richtlinie 3396: Bandschleifen in der Metallbearbeitung. Hrsg. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, 2003
- [VDI2860] VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Hrsg. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, 1990
- [Voll01] Voll, M.: Modelle zur thermischen Optimierung von Trockenschleifprozessen. Dissertation, TU Chemnitz, 2001
- [Vuk89] Vukobratovic, M.: Applied Dynamics of Manipulation Robots. Springer-Verlag, 1989
- [WB04] Wilke, T.; Brinksmeier, E.: Erfassung und Vermeidung thermischer Randzonenbeeinflussung beim Schleifen. Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, Band 5, S. 1-22, 2004
- [Web02] Weber, W.: Industrieroboter, Methoden der Steuerung und Regelung. Carl Hanser Verlag 2002
- [WJG99] Weihs, C.; Jessenberger, J.; Grize, Y.L.: Statistische Methoden zur Qualitätssicherung und -optimierung in der Industrie. Wiley-WCH, 1999
- [WoR05] International Federation of Robotics (IFR): World of Robotics 2005, Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment, 2005

- [ZC+04] Zhang X.; Cabaravdic, M.; Kneupner, K.; Kuhlenkötter, B.: Real-Time Simulation of Robot Controlled Belt Grinding Processes of Sculptured Surfaces. International Journal of Advanced Robotic Systems, 1/2, TU Wien, S. 109-115, 2004
- [ZKK05] Zhang X.; Kneupner, K.; Kuhlenkötter, B.: An efficient method for solving the Signorini problem in the simulation of free-form surfaces produced by belt grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Band 45 Heft 6, S. 641-648, 2005
- [Zie75] Zienkiewicz, O.C.: Methode der finiten Elemente. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, 1975