

# Strategien zum Außenrundlängsschleifen schlanker Werkstücke

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

von  
Diplom-Ingenieur Rudolf Christian **Ulrich** Wünsche  
aus Duisburg

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. W. König  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. W. Pleßmann

Tag der mündlichen Prüfung: 23. März 1992

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Erkenntnisse beim Außenrundlängsschleifen</b>	<b>3</b>
2.1	Verfahrensvarianten . . . . .	3
2.2	Setzstockeinsatz . . . . .	10
2.3	Steifigkeitsanalyse und Simulation . . . . .	14
2.4	Problemereich Oberflächenmarkierungen . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Numerische Simulation des Werkstoffabtrags</b>	<b>26</b>
4.1	Berücksichtigte Einflußgrößen und Systemaufbau . . . . .	27
4.1.1	Einflußgrößen . . . . .	27
4.1.2	Systemaufbau . . . . .	32
4.2	Simulationsläufe zur Vertiefung des Prozeßverständnisses .	38
<b>5</b>	<b>Analyse des Nachgiebigkeitsverhaltens schlanker Wellen als Voraussetzung eines stationären Prozeßverlaufs</b>	<b>47</b>
5.1	Analyseverfahren . . . . .	47
5.1.1	Analytische Vorgehensweise . . . . .	49
5.1.2	Methode von Castigliano . . . . .	54
5.1.3	Methode der Finiten Elemente FEM . . . . .	57
5.2	Verformung ohne Setzstockeinsatz . . . . .	61
5.2.1	Analyse des Verformungsverhaltens . . . . .	62
5.2.2	Einflußmöglichkeiten . . . . .	69
5.3	Kompensationsstrategie für den Setzstockeinsatz gegenüber dem Werkstück . . . . .	74

5.3.1	Mathematische Beschreibung . . . . .	75
5.3.2	Auswirkungen . . . . .	78
5.3.3	Praktische Anwendbarkeit . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Oberflächenbeschaffenheit im nunmehr stationären Längs-</b> <b>schleifprozeß</b>	<b>82</b>
6.1	Rauheit . . . . .	82
6.1.1	Scheibengeometrie . . . . .	82
6.1.2	Einflüsse der Stellgrößen . . . . .	83
6.2	Oberflächenmarkierungen . . . . .	88
6.2.1	Beschreibung des Phänomens . . . . .	88
6.2.2	Periodische Drehzahlvariation . . . . .	95
<b>7</b>	<b>Prozeßgestaltung beim NC-Schäl Schleifen mit Setzstock</b> <b>gegenüber dem Werkzeug</b>	<b>97</b>
7.1	Optimale Setzstockanordnung . . . . .	97
7.2	Auslegung der stationären Prozeßphase . . . . .	101
7.3	Gestaltung von Anschnitt- und Auslaufphase . . . . .	108
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>112</b>

## 8 Zusammenfassung

Durch das Verfahren Außenrundlängsschleifen sind in der Regel gleichzeitig hochwertige Oberflächen zu erzeugen und im Verhältnis zur Werkzeuggeometrie große Zerspanvolumina abzutragen. Dies führt dazu, daß ein durch die Anzahl der Freiheitsgrade äußerst komplexer Prozeß nur unter Inkaufnahme immenser Hauptzeiten durchgeführt werden kann.

Im Gegensatz zum Einstechschleifprozeß sind beim Längsschliff mehrere Zerspanzonen mit spezifischen Aufgaben und Verschleißverhalten zu unterscheiden, die sich im realen Prozeß allerdings der Analyse noch weitgehend verschließen.

Um das Prozeßverständnis zu fördern, wird in dieser Arbeit ein Simulationsprogramm entwickelt, das eine detaillierte Beschreibung der inneren Zusammenhänge ermöglicht. Dabei wird insbesondere auf die Modellierung des Abtrag- und Verschleißverhaltens Wert gelegt. Das Programm kann ebenfalls verwendet werden, um den im realen Prozeß zu erwartenden Durchmesser Verlauf zu bestimmen und den daraus resultierenden Formfehler bereits vor dem Prozeß zu kompensieren.

Anhand der vorhandenen Literatur sowie der Simulation wird nachgewiesen, daß das wesentlichste Problem bei der Zerspanung schlanker und damit nachgiebiger Werkstücke die Verformung durch die Schleifkräfte und die daraus resultierenden Formfehler sind. Insbesondere an den Enden der Bearbeitungsstelle führen instationäre Bedingungen im Prozeß zu nicht tolerablen Durchmesserabnahmen.

Um diesen Formfehler zunächst beschreiben zu können, werden drei mathematische Ansätze vorgestellt und bewertet, die sich hinsichtlich des Rechenaufwandes und der Detailliertheit der Strukturbeschreibung unterscheiden. Das Verformungsverhalten näherungsweise zylindrischer Werkstücke läßt sich analytisch beschreiben, was auch den Einsatz analytischer Untersuchungsmethoden eröffnet.

Kann ein Werkstück nur anhand mehrerer zylindrischer Elemente definiert werden, so sind die Methode nach Castigliano und die FEM zu verwenden, wobei letztere zusätzlich zur reinen Biegung auch den Schub einfluß berücksichtigt.

Anhand des analytischen Ansatzes werden die zwei grundsätzlichen Ty-

pen der Verformung Sattel und Tonne erläutert und unter Einsatz der Steifigkeitsrandbedingungen unterschieden. Es wird ausgeführt, daß die Ausprägung der Eigenverformung im Schleifprozeß nicht durch das  $l/d$  Verhältnis, sondern durch eine Ähnlichkeitszahl  $l^3/d^4$  auszudrücken ist.

Dieselbe Methode wird rechnerisch zur Optimierung des Nachgiebigkeitsverhaltens eines Werkstücks verwendet, so daß minimale Zylinderformfehler zu erwarten sind. Dabei zeigt sich, daß minimale Formfehler nicht unbedingt durch eine möglichst steife Einspannung bewirkt werden, sondern daß eine Schwächung der Struktur durchaus sinnvoll sein kann. Möglichkeiten zur Steifigkeitsanpassung werden ebenso wie die Grenzen des Praxiseinsatzes diskutiert.

Steht ein NC-Setzstock gegenüber dem Werkstück zur Verfügung, so kann das Ziel verfolgt werden, Werkzeug- und Werkstückoberfläche möglichst parallel zueinander zu führen, um niedrigere Formfehler und höhere Oberflächengüten zu erzeugen.

Abhängig von der Bearbeitungsposition sind dazu Setzstock und Spindelstock radial anhand eines kraftproportionalen Zustellprofils zu korrigieren. Der Setzstock ist dabei nicht gegenüber der Werkstückmitte, sondern an der Stelle maximaler Eigenverformung zu positionieren.

Diese Strategie ist ebenfalls zur Minimierung des Zylinderformfehlers beim Außenrundeinstechschleifen einzusetzen, wenn die Wechselwirkungen zwischen Kompensationsstrategie und nominaler Einstechbewegung berücksichtigt werden.

Nach einer Optimierung der Prozeßgeometrie unter Zuhilfenahme der erläuterten Methoden ist es möglich, die Oberflächenqualität deutlich zu steigern. Dies wird anhand von Untersuchungsreihen zum Außenrundschälenschleifen mit teilweise konisch abgerichteter Schleifscheibe verdeutlicht.

Es zeigt sich, daß durch hohe Überschliffzahlen und geringe Werkstückgeschwindigkeiten im zylindrischen Scheibenbereich hervorragende Rauheiten erzielbar sind. Mit einer Schleifscheibe 60er Körnung werden Rauheiten bis unter  $0,5 \mu\text{m}$  erreicht. Auch Abrichtüberdeckungsgrade von weit über 20 führen zu deutlichen Verbesserungen der Oberflächenqualität.

Gerade in diesem Rauhtiefenbereich werden Oberflächenmarkierungen beobachtet, die durch Abbildung der Werkzeugtopographie auf der Werk-

stückoberfläche entstehen. Dieses meßtechnisch nicht sicher bewertbare Phänomen wird rechnerisch analysiert, wobei aus der Chaostheorie bekannte komplexe Auswirkungen der Stellgrößen verdeutlicht werden. Es lassen Empfehlungen zur Stellgrößenwahl geben, die zu minimalen optischen Auswirkungen der Erscheinung führen.

Zur Erzielung der erwähnten Oberflächengüten ist das Außenrundschleifen prädestiniert. Auch extrem schlanke Werkstücke lassen sich mit diesem Verfahren bearbeiten, wenn mit einem Setzstock gegenüber der Schleifscheibe gearbeitet wird, wobei auf eine anforderungsgerechte Feinpositionierung zu achten ist.

Bei Kenntnis verschiedener Randbedingungen sowie der Abhängigkeit zwischen Stellgrößen und Oberflächenqualität kann nun der Schälenschleifprozeß ausgelegt werden. Die instationären Phasen beim Werkzeugein- und -austritt erfordern angepaßte Strategien, mit denen minimale Formfehler möglich werden.

Damit stehen dem Anwender zahlreiche Ansätze zur Verfügung, mit denen er Schleifaufgaben aus dem Bereich des Längsschleifens mit den an heutigen NC-Maschinen bereitstehenden Potentialen wissenschaftlich abgesichert lösen kann.