

# Entwicklung einer Vorschub- und Drehzahlregelung auf Basis des Zerspankraftmodells nach Kienzle

Dipl.-Ing. Frank Arnold

## 1 Einleitung

Durch den Einsatz von modernen CNC mit ihren technischen Möglichkeiten, ohne zusätzlich notwendige Sensoren, aktuelle Prozessdaten eines Zerspanungsprozesses zu erfassen, ergeben sich neue Ansätze für gezielte Beeinflussung /MUE-17/.

Auf Basis dieser Prozessdaten kann eine Bewertung eines laufenden Bearbeitungsprozesses hinsichtlich Stabilität und Qualität erfolgen. Ein wesentliches Merkmal der Prozessqualität ist die Auslastung der Antriebe der Vorschubachsen und der Hauptspindel. Diese Auslastung repräsentiert den prozentualen oder absoluten Wert des anliegenden Drehmomentes in Bezug auf das Nennmoment des jeweiligen Antriebes. Unter Nutzung dieser Daten kann eine Regelung implementiert werden, die bei einer Abweichung von den Planungsvorgaben die technologischen Hauptparameter Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit nach entsprechenden Zielstellungen anpasst.

Als Basis für die Anpassungen kommt das Zerspankraftmodell nach Kienzle zur Anwendung /Kie-52/.

## 2 Mathematische Grundlagen

Das Zerspankraftmodell nach Kienzle stellt einen praxistauglichen und anwendungsfreundlichen Ansatz zur Bestimmung der auftretenden Kräfte in der spanenden Bearbeitung dar. Die als Gesamtkraft wirkende Zerspankraft  $F_z$  berechnet sich aus der Passivkraft  $F_p$  und der Aktivkraft  $F_a$ . Den grundlegenden Zusammenhang stellt folgende Gleichung dar:

$$F_i = k_{i1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_i)} \quad \text{mit } i = c, f, p \quad (1)$$

Für die weitere Betrachtung wird die Schnittkraft  $F_c$  herangezogen, um daraus das an der Hauptspindel wirkende Schnittmoment  $M_c$  mathematisch zu bestimmen.

$$F_c = \frac{2 \cdot M_c}{D} \quad (2)$$

Der Hauptwert der spezifischen Schnittkraft  $k_{c1.1}$  definiert die Schnittkraft, die bei einer Spanungsdicke  $h$  und Spanungsbreite  $b$  von jeweils 1 mm wirkt. Nach Berücksichtigung aller notwendigen theoretischen Ansätze nach Kienzle ergibt sich für die Fräsbearbeitung mit einem mehrschneidigen Fräs Werkzeug der folgende Ansatz für das Schnittmoment:

$$M_c = \frac{k_c \cdot (\cos \phi_E - \cos \phi_A) \cdot a_p \cdot D \cdot v_f}{2 \cdot 360^\circ \cdot n} \quad (3)$$

## 3 Entwurf der Regelung

Die dargestellten mathematischen Zusammenhänge können für die Überwachung und Regelung eines Zerspanungsprozesses herangezogen werden. Bei konstanten

technologischen Eingriffsbedingungen ist das Schnittmoment ebenfalls konstant. Ändert sich das Moment im Prozess, so kann von einer Änderung der technologischen Randbedingungen ausgegangen werden. Gründe dafür können u.a. geänderte Eingriffsbedingungen (Aufmassschwankungen, fehlerhafter Werkstücknullpunkt), Werkzeugverschleiß sowie Anomalitäten im Materialgefüge sein. Die Effekte können sich sowohl eine Unterlast als auch eine Überlast an der Hauptspindel zur Folge haben. Um auf diese Umstände flexibel zu reagieren, müssen entsprechend der theoretischen Vorbetrachtung nach Kienzle die einstellbaren technologischen Größen geregelt werden. Diese Größen sind die an der CNC-Maschine einstellbaren Parameter Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  und Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , welche durch die Drehzahl repräsentiert wird.

Nach dem Start eines Programmes wird eine Überwachungsfunktion aktiv (Abbildung 1), welche einen Soll-Wert für die Auslastung  $a$  mit einem Ist-Wert vergleicht.

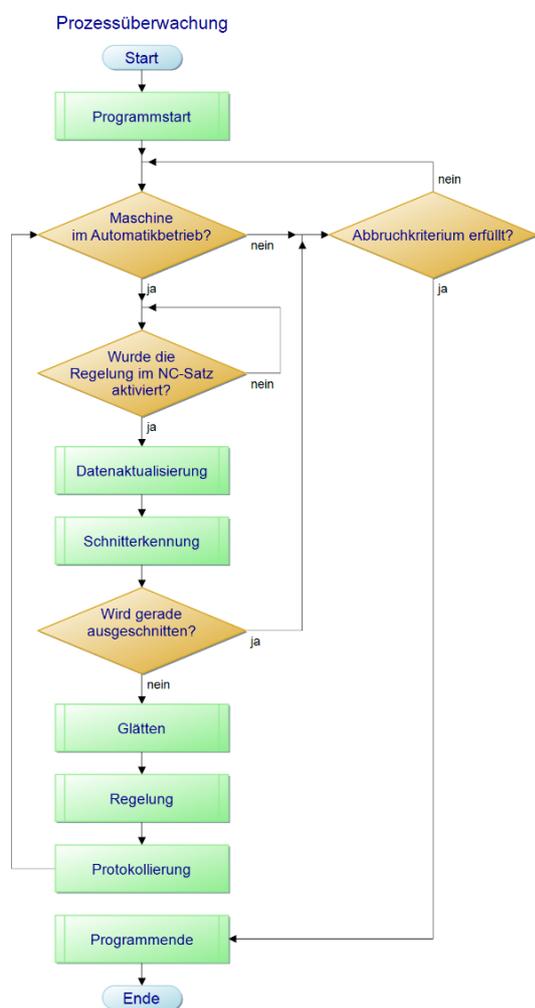


Abbildung 1: Programmablaufplan (PAP) der Prozessüberwachung

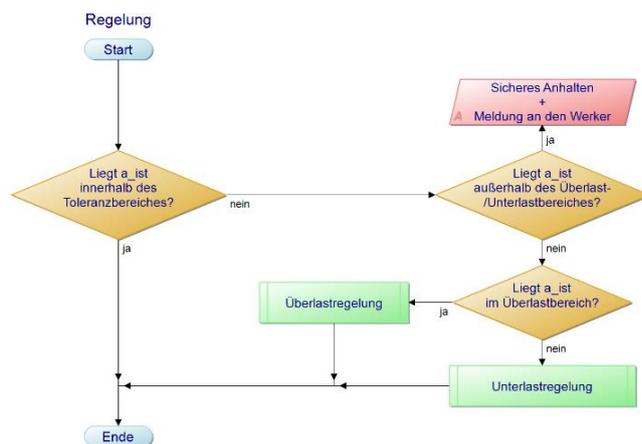


Abbildung 2: PAP des Unterprogramms Regelung

Bei einer über einen Toleranzbereich hinausgehenden Abweichung (Abbildung 2) wird eine Unterscheidung zwischen einem Unterlastfall (Abbildung 3), die Ist-Auslastung ist geringer als der geplante Wert, und einem Überlastfall (Abbildung 4), die Ist-Auslastung übersteigt dauerhaft den geplanten Wert, vorgenommen.

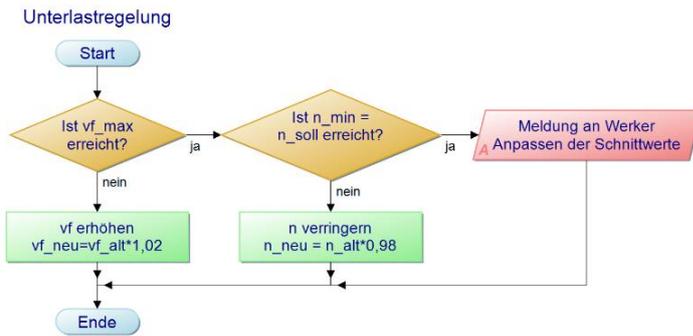


Abbildung 3: PAP des Unterprogramms Unterlastregelung

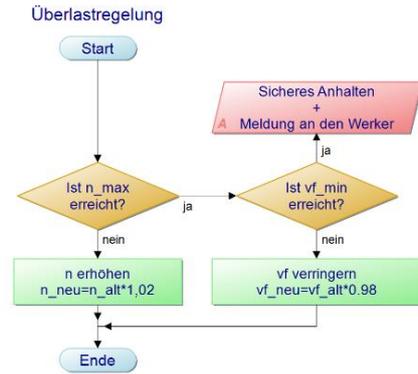


Abbildung 4: PAP des Unterprogramms Überlastregelung

Im Unterlastfall wird im ersten Schritt geprüft, ob eine vom Werkzeug und der Technologie begründete maximal Vorschubgeschwindigkeit bereits erreicht ist. Ist die nicht der Fall, so wird durch eine Erhöhung der Zahlvorschub durch die Vorschubgeschwindigkeit Schrittweise erhöht, bis die Auslastung wieder im Toleranzbereich liegt.

Im Überlastfall wird im geprüft, ob die für das Werkzeug maximal zulässige Schnittgeschwindigkeit erreicht ist. Ist die nicht der Fall, so wird die Drehzahl und damit die Schnittgeschwindigkeit schrittweise erhöht. Damit reduziert sich der Zahnvorschub, wodurch bei gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit die Auslastung der Hauptspindel sinkt. Reicht dieser Regeleingriff nicht aus, so wird nach Erreichen der zulässigen Maximaldrehzahl der Wert für die Vorschubgeschwindigkeit reduziert mit dem Ziel, die Ist-Auslastung in den Toleranzbereich zu bringen. Sind beide Maßnahmen nicht ausreichend, so wird die Bearbeitung unterbrochen und der Bediener informiert.

Die Regelung wird durch die Überwachung der aktuellen Werkzeugpositionen nur im Bereich konstanter Eingriffsverhältnisse aktiviert. Befindet sich das Werkzeug ausserhalb des Werkstücks, so wird nicht geregelt.

#### 4 Umsetzung und Test

Als Testumgebung wurde eine 3-Achs-Fräsmaschine mit der CNC andronic 3060s (Abbildung 5) der Firma LTI Motion genutzt. Die Erfassung der aktuellen Prozessdaten wie Auslastungen der Hauptspindel und der Vorschubantriebe und Positionsdaten erfolgt über eine Softwareschnittstelle, die andron function library (af).



Abbildung 5: Modellfräsmaschine mit CNC andronic 3060 s

Der Regelalgorithmus wurde als C++-Projekt umgesetzt. Für die Vorgabewerte (u.a. Schnitttiefe axial und radial, Soll-Auslastung, Werkzeugdurchmesser, Zähnezahl) wurde eine Initialisierungsdatei genutzt.

Für die Tests kommen Kunststoffmaterial SIKA M960 und Aluminium AlZnMgCu1,5 (EN-AW 7078) zum Einsatz; als Werkzeuge zur Trockenbearbeitung werden Voll-Hart-Metall (VHM) Fräser der Firma Hoffman mit unterschiedlichen Durchmessern eingesetzt.

Vor Beginn der Versuche auf der Modellfräsmaschine musste eine Kalibrierung vorgenommen werden. Die Kalibrierung stellt den Zusammenhang zwischen der erfassten Auslastung und dem anliegenden Moment her.

Die Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Auswertung eines Versuches.

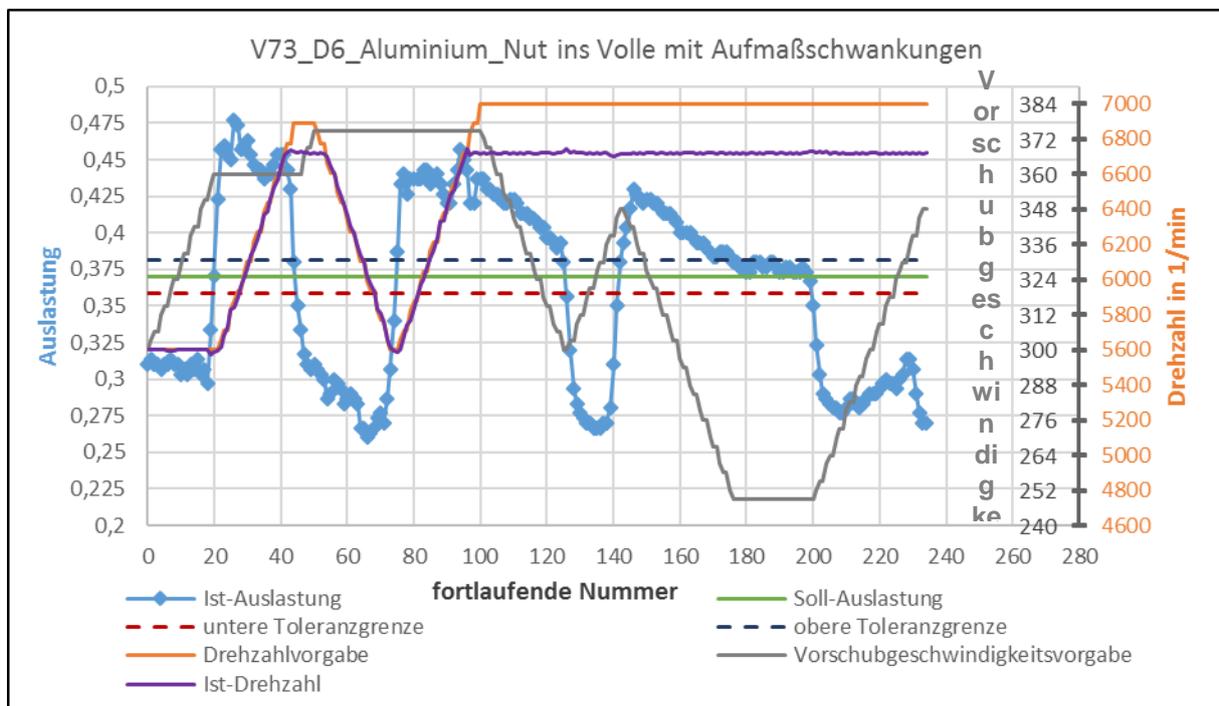


Abbildung 6: Versuchsdaten - Nut ins Volle mit Aufmaßschwankungen

Die aufgezeichnete Prozessdaten zeigen die Funktion der Regelung. Tritt der Fall einer Unterlast ein wird die Vorschubgeschwindigkeit zuerst auf das Maximum

erhöht. Reicht diese Maßnahme nicht aus, um das System in den Toleranzbereich zu bringen, so wird die Drehzahl verringert. Um keinen zusätzlichen Werkzeugverschleiß zu generieren kann die Drehzahl nur bis auf die Sollvorgabe abgesenkt werden. In vorliegendem Versuch wurde auf eine Sollauslastung von 0,37, d.h. 37% des Nenndrehmomentes der Hauptspindel, und einen Toleranzbereich von  $\pm 3\%$  um den Sollwert geregelt. Die Schnitttiefe  $a_p$  betrug 2 mm festgelegt, veränderte sich jedoch während des Schnitts aufgrund der sich durch die Werkstückvorbearbeitung ergebenden Nuten.

## 5 Zusammenfassung

Die Erfassung und Überwachung anfallender Prozessdaten ist ein zentrales Thema der aktuellen Entwicklungen im Maschinenbau. Im Zusammenhang mit aktuellen Entwicklungen der Industrie 4.0 werden immer mehr Maschinendaten erfasst und weiterverarbeitet. Eine Art der Weiterverarbeitung ist die aktive Prozessbeeinflussung.

Ziel ist es damit den Prozess zu optimieren, zu stabilisieren und die Ressourcen besser zu nutzen.

Mit der Auswertung der durchgeführten Versuche zur Überprüfung des Regelalgorithmus Versuchsauswertung konnte gezeigt werden, dass die Regelung sehr schnell auf eine Verletzung des Toleranzbereiches reagiert und eine Anpassung der Parameter Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit vornimmt. Unter Anwendung des Zerspankraftmodells nach Kienzle wird eine Anpassung vorgenommen, welche technische Randbedingungen (maximal Schnittgeschwindigkeit, maximale Vorschubgeschwindigkeit) einhält und gleichzeitig die wirtschaftlichen Aspekte mit (minimale Bearbeitungszeit) berücksichtigt.

Mit der ohne zusätzliche Sensorik umgesetzten Prozessüberwachung und -beeinflussung können Bearbeitungszeiten verkürzt, auf Probleme während der Bearbeitung schnell reagiert und Werkzeuge effektiver genutzt werden.

## Literatur

/MUE-17/ Münch, C.: Entwurf und prototypische Umsetzung einer auslastungsbasierten Vorschub- und Drehzahlregelung für die offene CNC-Steuerung andronic 3060 unter Nutzung des Zerspankraftmodells nach Kienzle. Diplomarbeit TU Dresden 2017

/KIE-52/ Kienzle, O.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. In: VDI-Z 94 (1952), 11-12, S. 299–305