



Weniger Werkzeugwechsel je Schicht, weniger Einsatzwerkzeuge und weniger Produktionsstillstand bei Einhaltung des Qualitätsstandards – das konnte in Teil I dieses Beitrages als wesentlicher Effekt automatischer Werkzeugsteuerungen (AWS) zur Prozessregelung und Überwachung auf Bruch und Verschleiß festgehalten werden [1]. Ein weiterer betriebswirtschaftlicher Nutzen von AWS-Systemen (Bild 1) lässt sich von folgender häufig praktizierter Verfahrensweise zur Verlängerung von Werkzeugstandzeiten und zur Vermeidung von Produktionsunterbrechungen ableiten: Man drosselt die Schnittleistung. Das kann so weit getrieben werden, dass ein Werkzeugschaden generell unwahrscheinlich ist und somit auf ein Überwachungssystem grundsätzlich verzichtet werden könnte. Damit wäre man dann alle Probleme los – so scheint es zumindest.

Im oberen Diagramm des Bildes 2 ist dargestellt, wie sich die Belastung eines Werkzeugs während eines Bearbeitungsprozesses durch Zunahme der Spanleistung ändern kann. Die Grenze der Belastbarkeit ist die Werkzeuggrenze, nicht die Maschinenleistung, die bekanntlich auf das größte ver-

Dipl.-Ing. Horst Nikisch ist Inhaber der Nikisch Systemtechnik in 28865 Lilienthal, Tel. (0 42 98) 20 44, Fax (0 42 98) 20 80.

Bild: Kennametal Herrel



**Werkzeug-Überwachungssysteme erfüllen nur dann die Erwartungen, wenn sie kurzzeitige Unregelmäßigkeiten von schwerwiegenden Störungen unterscheiden können.**

## Den Verschleißzustand ermitteln mit automatischer Werkzeugsteuerung

**Für die immer häufiger geforderte Überwachung von Werkzeugen auf Bruch und Verschleiß wurde eine automatische Werkzeugsteuerung konzipiert. Das leicht nachrüstbare, für kleine und große Serien geeignete System unterdrückt Fehlalarme und passt sich selbstständig den Prozessbedingungen an. Für alle Vorgänge wird nur ein Parameter benötigt.**

HORST NIKISCH

wendbare Werkzeug ausgelegt ist. Das Problem besteht darin, dass die Schnittleistung im NC-Programm so vorgegeben werden muss, dass alle Eventualitäten berücksichtigt sind, die während der Bearbeitung auftreten können. Hierzu gehören mögliche Aufmaßschwankungen, Einspannfehler, Spanstörungen oder einfach nur Konturänderungen, die sich auf die Werkzeugbelastung auswirken. Diese Zufälligkeiten sind nicht kalkulierbar. Gerade deshalb birgt ein solches Vorgehen erhebliche Unsicherheiten, die trotz allem zu einem vorzeitigen Versagen des Werkzeugs führen können.

Geht der Programmierer an die Grenzen der Belastbarkeit, so hat er zwar eine hundertprozentige Auslastung,

aber eine Standzeit, die unter Umständen nicht einmal ausreicht, um einen Bearbeitungsschritt zu Ende zu führen. Das kann man nicht riskieren und deshalb muss man entsprechend vorgehen und die Schnittleistung um einen gewissen Betrag heruntersetzen. Das kann beispielsweise durch Verminderung der Vorschubgeschwindigkeit oder der Spantiefe geschehen. In jedem Falle sind das Maßnahmen, die die Wirtschaftlichkeit des Zerspanprozesses stark beeinträchtigen.

Selbst wenn alle Leistungsspitzen kalkulierbar wären: Innerhalb eines NC-Satzes können die Schnittwerte nicht geändert werden, abgesehen davon, dass es keine Information über die aktuelle Belastung während des

Schnittes gibt. Demzufolge muss die Schnittleistung für den gesamten Bearbeitungsgang von Anfang an fest vorgegeben werden und das bedeutet, dass der Auslastungsgrad von Werkzeug und Maschine für die gesamte Strecke drastisch reduziert ist, wogegen die wirklichen Probleme nur innerhalb eines Bruchteils der Bearbeitungszeit auftreten.

Bild 2 verdeutlicht im oberen Diagramm, welche Auswirkungen es auf die Wirtschaftlichkeit hat, wenn der Programmierer an verschiedene Vorgaben gebunden ist. Diese Verhältnisse sind nicht allgemeingültig, aber auch keine Seltenheit, wie mit zahlreichen Produktionsprotokollen in verschiedenen Fertigungsstätten nachgewiesen werden konnte. Natürlich weiß das jeder Fertigungsleiter. Es blieb ihm jedoch bislang keine andere Wahl, als einen solchen Kompromiss einzugehen.

**System regelt Überlasten bei Bedarf selbsttätig aus**

Hier Abhilfe zu schaffen, ist ein wesentlicher Gesichtspunkt des AWS-Verfahrens. Die Anwender-Logik ist einfach: Programmieren auf maximale Schnittleistung und überlasse es dem AWS-System, Überlasten dann auszuregeln, wenn sie auftreten. Das untere Diagramm in Bild 2 ist ein praktisches Beispiel dafür. Es bezieht sich auf einen Produktionsprozess, bei dem die am NC-Panel angezeigte Leistungsaufnahme der Maschine mitgeschrieben wurde ohne das NC-Programm zu ändern. Man erhöhte lediglich den „Override“ schrittweise bis zu einem Wert von 120 %.

Mit dieser Vorgehensweise kann man die Leistungsfähigkeit des Systems am schnellsten und überzeugendsten demonstrieren. Dabei hängt natürlich die Steigerungsmöglichkeit des Vorschubs von dessen Grundprogrammierung ab, das heißt von der Lage des Programmierpunkts entsprechend dem oberen Diagramm.

Wenn auch das Diagramm im Maßstab stark gedrängt ist, so fällt doch auf, dass Lastspitzen in diesem Bearbeitungsfall relativ selten aufgetreten sind. Das bestätigt die Unwirtschaftlichkeit der im Originalprogramm generell reduzierten Schnittdaten. Man erkennt außerdem die steigende Tendenz der Lastkurve, die auf die zunehmende Abnutzung des Werkzeugs zurückzuführen ist. Daran wird auch die Bedeutung der Lasttoleranz deutlich, mit der die Werkzeuggrenze nach unten oder oben verschoben werden kann und

entsprechend früher oder später den Verschleiß des Werkzeugs anzeigt.

Der Programmierer hat damit mehrere Möglichkeiten, seinen Prozess zu optimieren, je nachdem, ob er auf die Verlängerung der Standzeiten oder auf kürzeste Bearbeitungszeiten Wert legt und er kann diese beiden Möglichkeiten natürlich auch kombinieren. Das Arbeitsergebnis ist dabei stets das Gleiche. Es ist nur die Höhe der Lasttoleranz vorzugeben, und zwar so, dass die vorgeschriebenen Fertigungstoleranzen gerade noch eingehalten werden – nicht mehr und nicht weniger, denn beides wirkt sich auf die Kosten aus.

Die mit Recht gefürchteten Einstellarbeiten für obere und untere Grenzwerten, Dämpfungs- und Verstärkungsfaktoren und anderes, wie sie von anderen Überwachungssystemen her bekannt sind, machen solche Systeme allenfalls für die Großserienfertigung geeignet. Aber auch dann bestehen Zweifel an der Rentabilität, wenn die Einstellungen bei jeder anderen Materialcharge oder Werkzeuglieferung geändert werden müssen. Das ist niemals ohne eine entsprechende Musterfertigung zur Bestimmung der Grundwerte möglich, aber eben dies ist bei der Mehrzahl der Fertigungsaufgaben nicht machbar. So wäre gegenüber anderen Überwachungssystemen nicht viel gewonnen, wenn man beim AWS-Verfahren für jedes möglicherweise zum Einsatz kommende Werkzeug die jeweilige Lasttoleranz bestimmen und programmieren müsste.

Weil man die passende Lasttoleranz für eine Bearbeitungsaufgabe aufgrund der Vielzahl unbekannter Faktoren nicht berechnen kann, ist dafür ein vernünftiger Ansatz zu finden. Das aber ist möglich, denn wie erläutert ist die kleinstmögliche sinnvolle Lasttoleranz die Maschinenkonstante. Folgerichtig programmiert sich AWS also selbst.

Mit der eingelesenen Werkzeugnummer wird festgestellt, ob es sich um ein bekanntes oder ein noch unbekanntes Werkzeug handelt. Im ersten Falle ist die Lasttoleranz vom vorangegangenen Bearbeitungsgang her bekannt, im zweiten Falle wird automatisch die Maschinenkonstante als Lasttoleranz vorgegeben. Der Maschinenbediener kann diesen Vorschlagswert beibehalten oder auch im laufenden Prozess ändern, wenn das Arbeitsergebnis nicht seinen Anforderungen entspricht. Ein typischer Anwendungsfall, gewonnen



**Bild 1: Kompaktgerät Automatische Werkzeugsteuerung (AWS) zur aufwandsarmen Werkzeugkontrolle in der Einzel- und Serienfertigung.**



aus einem realen Prozessgang, unterstreicht dieses Vorgehen. Gemäß Bild 3 beginnt die Bearbeitung mit dem Aufruf einer für das System neuen Werkzeugnummer und der Vorgabe der Lasttoleranz

ranz von 1,5 %. Nach der eingezeichneten Bearbeitungszeit meldet das System, dass Prozessbedingungen eingetreten sind, die die vorgegebene Belastungsgrenze ständig überschreiten. Welchen Grund das hat, ist zunächst noch nicht bekannt. Aber der Bediener erkennt, dass Bauteil und Werkzeug noch in Ordnung sind, so dass diese Mehrbelastung prozessbedingt ist und er passt die Lasttoleranz diesen Bedingungen an. Mit dem neuen Wert von 2,5 % wird die Bearbeitung störungsfrei fortgesetzt.

Im Beispielfall zeigen mehrere Aufrufe des gleichen Werkzeugs an den Folgetagen, dass die einmal eingestellte Lasttoleranz gespeichert ist und nicht erneut ermittelt werden muss. Die Bearbeitung läuft bis zum Erreichen der Verschleißgrenze oder wie in diesem Falle bis zur Abarbeitung der vorgegebenen Losgröße ohne Bedieneringriff weiter.

### Gesamte Programmierdauer beträgt nur vier Sekunden

Man könnte am AWS-Verfahren kritisieren, dass die Vorschubverminderung der adaptiven Regelung einen Zeitverlust bedeutet und die Frage stellen, worin denn dann der Vorteil bestünde. Die Antwort auf diesen Einwand ist einfach. Im unteren Teil des Bildes 3 sind die Protokolldaten aufsummiert, die während des Bearbeitungsbeispiels aufgenommen wurden. In der Beschreibung der Überwachungsstrategie (Teil I dieses Beitrags) ist das Verfahren der Reduktion auf zwei Vorschubstufen bei Überschreitung der Lasttoleranz vorgestellt worden.

Im vorliegenden Beispiel betragen die entsprechenden Werte 90 % für die Vorschubstufe 1 und 70 % für Stufe 2. Das Protokoll weist 27 Regelvorgänge auf Stufe 1 aus, die mit einer Haltezeit von 1 s belegt waren. Drei Regelvorgänge auf Stufe 2 wurden mit einer Haltezeit von jeweils 2 s durchgeführt. Die daraus zu errechnende Zeitverzögerung beträgt  $2,7 + 1,8 = 4,5$  s. Dazu kommen noch 4 s, die der Bediener zur Wahrnehmung des Ereignisses und zur neuen Einstellung der Lasttoleranz benötigt hat. Das ist in diesem Beispiel gewissermaßen die „Programmierarbeit“ für das AWS-System gewesen.

Gemäß dem zur Prozessoptimierung Gesagten müsste ohne adaptive Regelung über die gesamte Bearbeitungszeit von in diesem Fall 98 min der Vorschub auf 70 % reduziert werden, damit die Werkzeuggrenze keinesfalls überschritten wird. Aus den 8,5 s Zeitverlust mit Regelung würden dann rund 30 min

werden – eine bemerkenswerte Differenz.

An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass das Maß für die Vorschubreduktionen sowie die dazu erforderlichen Haltezeiten in erster Linie von der Dynamik der Antriebe abhängen. Es sind als Reduktionsstufen 95/90 % und Haltezeiten von einigen hundert Millisekunden realisierbar, wodurch sich die Gesamtbilanz noch weiter verbessert.

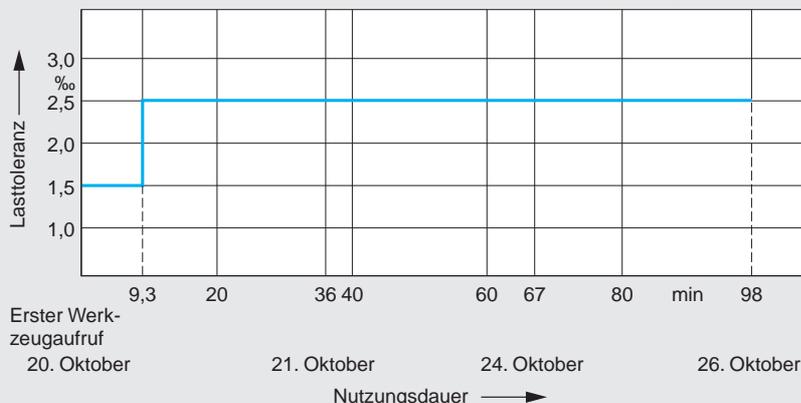
Bislang sind solche Prozessstörungen betrachtet worden, die in dem Regelbereich liegen, der von der Lasttoleranz vorgegeben wird. Auf diese Weise ist die Empfindlichkeit einstellbar, mit der das System reagieren soll. Das gilt sowohl für kurzzeitige Störungen als auch für länger andauernde und diese haben die entsprechende adaptive Regelung beziehungsweise den Abbruch der Bearbeitung im Schadenfall zur Folge.

Der Maschinenbediener ist bestrebt, die Empfindlichkeit so feinfühlig einzustellen, dass die für die Bearbeitungsqualität maßgebenden Prozessstörungen erfasst werden. Er möchte nicht, dass die Fehlerlogik auch bei regulären Prozessänderungen anspricht. Hierzu braucht man sich nur das Planfräsen eines Motorgehäuses vorzustellen. Die zahlreichen Änderungen der Schnittbedingungen infolge der Konturänderungen würden eine ständige Vorschubregelung und irgendwann den Abbruch der Bearbeitung verursachen, so dass eine zügige Fertigung nicht zustande käme. Würde man aus diesem Grunde die Lasttoleranz erhöhen müssen, hätte das die gleichen fatalen Folgen, die im Zusammenhang mit dem Verhalten anderer Überwachungssysteme beschrieben wurden.

Das AWS-Verfahren löst dieses Problem durch die Vorgabe einer zweiten Überwachungsschwelle, die der Lasttoleranz überlagert ist. Diese zweite Schwelle wird automatisch zur eingestellten Lasttoleranz berechnet und bildet die so bezeichnete „Grenzschwelle“.

Wenn die automatische Abtastung der Drehzahl irgendwann im Verlauf der Bearbeitung die Überschreitung der Grenzschwelle ergeben hat, wird die nächste Abtastung beim Vorhandensein eines regulären Lastbedarfs den Wert bestätigen oder sie wird einen Rückgang der Belastung feststellen. Im ersten Fall wird dann eine automatische Anhebung des Nominal-Lastwertes vorgenommen, im anderen Fall wird dieser Wert wieder zurückgenommen.

- AWS setzt automatisch Lasttoleranz von 1,5‰ beim ersten Aufruf des Werkzeugs.
- Überschreiten dieser Belastungsgrenze erstmals nach 9,3 min Bearbeitungszeit.
- Bediener erkennt: Bauteil und Werkzeug sind in Ordnung und setzt die Belastungsgrenze auf 2,5‰.
- Danach 90 min kontinuierliche Produktion bei mehreren Werkzeugaufrufen.



Regelzeiten: 27 mal 1 s mit 90% Vorschub ergibt 2,7 s Zeitverzögerung  
 3 mal 2 s mit 70% Vorschub ergibt 1,8 s Zeitverzögerung  
 Einstellzeit: 1 mal 4 s

**Bild 3: Einsatzcharakteristik eines 25-mm-Fräswerkzeuges über einen Zeitraum von sechs Arbeitstagen als Beispielfall aus der Praxis.**

Bild: Verfasser

Auf diese Weise wird, und zwar unter ständiger Beibehaltung der Grundempfindlichkeit, das Bezugsniveau vom Prozessgeschehen automatisch gehoben oder gesenkt. Das ist der Effekt der adaptiven Regelung und der Definition von relativen Überwachungskriterien anstelle von Absolutwerten.

Somit ist auch erklärbar, warum beim AWS-Verfahren die programmierte Grundlast der Bearbeitung (Nominallast) keine Rolle spielt. Es soll schließlich nicht der Programmierer kontrolliert werden, sondern der Prozess ist auf nicht kalkulierbare Störungen zu überwachen.

**Verfahren ist auch geeignet für die Einzelfertigung**

Mit der Definition der Grenzwelle ist es nur noch ein kleiner Schritt zur Werkzeugbruchererkennung. Aus den physikalischen Gesetzmäßigkeiten ergibt sich, dass die bei einem Teil- oder Gesamtbruch eines Werkzeugs auftretenden Kräfte mit Sicherheit alle anderen Einflüsse übersteigen müssen. Sie haben dazu noch das Merkmal, dass sie von sehr kurzer Dauer sind. Diese beiden Gegebenheiten führen dann dazu, dass bei einem Werkzeugbruch die Grenzwelle überschritten wird und unmittelbar danach die Drehzahl zwangsläufig im Leerlauf ist.

Mit der Abtastautomatik werden diese Zusammenhänge erfasst und es

wird in dem Falle nicht die beschriebene Lastanhebung durchgeführt, sondern das Werkzeugbruch-Signal ausgegeben. Sofort schaltet sich dann der Vorschub automatisch ab oder es werden andere Funktionen ausgelöst.

Man kann festhalten, dass ein Verfahren entwickelt worden ist, das Zerspanprozesse mit rotierenden Werkzeugen auf sehr einfache Weise überwacht und ausregelt. Das Prinzip unterdrückt Fehlalarme und steuert den Prozess derart, dass eine kontinuierliche Qualitätskontrolle im laufenden Schnitt erfolgt. Für alle Überwachungs-, Regel- und Signalvorgänge wird nur ein Parameter benötigt. Er ist gegeben mit der „Lasttoleranz“, die ein Maß für die zulässigen Drehzahländerungen darstellt, in der sich alle Prozessdaten und Prozessänderungen widerspiegeln.

Ohne komplizierte Einstellarbeiten oder Musterfertigungen zu benötigen, nimmt das Verfahren mit dem ersten Anschnitt die vom Programmierer bestimmte Grundlast auf und bezieht alle weiteren Vorgänge auf dieses Niveau. Damit ist das Verfahren auch für eine Einzelfertigung geeignet. Wegen seines besonders einfachen Aufbaus ist das System ohne großen Aufwand zur Nachrüstung von Maschinen geeignet.

**Literatur**

[1] Nikisch, H.: Automatische Werkzeugsteuerung erkennt Verschleiß und Bruch. Maschinenmarkt 106 (2000) 3, S 34–37.