Daniel Diaz Ocampo*, German Gonzalez, Frederik Zanger und Michael Heizmann

Schätzung der Segmentspanbildungsfrequenz mithilfe von Körperschallsignalen

Estimating the chip segmentation frequency using structure-borne signals

DOI 10.1515/teme-2021-0059

Zusammenfassung: Da die Spansegmentierungsfrequenz bei der Zerspaltung hochfester Materialien in direktem Zusammenhang mit dem Eigenspannungszustand des Werkstücks steht, ist sie eine wichtige Kenngröße. Bei bisherigen Methoden kommt hauptsächlich, zur Schätzung der Segmentspanbildungsfrequenz mithilfe von Körperschallsignalen beim orthogonalen Schnitt, die Fourier-Transformation zum Einsatz, welche jedoch bei den im Außenlängsdrehen vorkommenden, stark unharmonischen Signalen ungeeignet ist. Es wird eine Methode vorgestellt, welche die Periodizität der Körperschallsignale im Zeitbereich ermittelt und daraus die Segmentierungsfrequenz schätzt. Dazu werden zeitvariante Merkmale vorgestellt, welche die Segmentspanbildungsfrequenz approximieren. Im Anschluss wird die Methode mit beim orthogonalen Schnitt eingesetzten Methoden verglichen, wobei gezeigt werden kann, dass die hier vorgestellte Methode grundsätzlich robuster gegenüber Störeinflüssen ist, bei den zeitvarianten Merkmalen jedoch noch Potenzial zur Verbesserung besteht.

Schlüsselwörter: Außenlängsdrehen, Segmentspanbildungsfrequenz, Körperschall, Signalverarbeitung.

Abstract: Since the chip segmentation frequency in cutting processes is directly related to the residual stress state of the workpiece, it is an important parameter in cutting processes. In previous methods, the Fourier transform is mainly used to estimate the chip segmentation frequency using structure-borne sound signals in the orthogonal cut, which is unsuitable for the strongly non-harmonic signals occurring in external longitudinal turning. A method is presented which determines the periodicity of the structure-borne sound signals in the time

domain and estimates the chip segmentation frequency from it. For this purpose, time-variant features are presented which approximate the segmentation frequency. Afterwards, the method is compared with methods used in orthogonal cutting. It can be shown that the method presented here is basically more robust against disturbing influences, but there is still potential for improvement in the features.

Keywords: External longitudinal turning, chip segmentation frequency, structure borne sound, signal processing.

1 Einleitung

Bei der Herstellung von hochbelastbaren Bauteilen werden hohe Anforderungen an die Randschichteigenschaften gestellt und insbesondere definierte Eigenspannungszustände gefordert [6]. In [7] wurde gezeigt, dass die periodisch auftretenden Segmentspäne eine starke Korrelation mit den Oberflächeneigenschaften aufweisen. Daher ist die Segmentspanbildungsfrequenz eine wichtige Größe bei der Schätzung der Randschichtzustände der Werkstücke. Eine bewährte Methode zur Überwachung des Prozesses ist die Auswertung der akustischen Emissionen [2]. Die Messung der Segmentspanbildungsfrequenz stellt dabei eine besondere Herausforderung dar [3].

Zur Aufnahme der akustischen Emissionen werden, wie in [1] beschrieben wird, Körperschallsensoren eingesetzt, die möglichst nahe an der Schneide entlang der Achse der Schnitttrichtung an dem Werkzeughalter angebracht werden. Bei den Signalen handelt es sich um Schallemission und daher um Beschleunigungen, die durch die Kräfte des Schnittprozesses in das Werkzeug übertragen werden [4]. Entsteht bei dem untersuchten Schnittprozess ein Segmentspan wirkt, beim Aufbau eines Segments eine höhere Kraft auf die Schneide als beim Ablösen des Segments. Diese Krafteinflüsse rufen Vibrationen hervor, welche durch die Schneide zum Körperschallsensor übertragen werden. Wie in [5] durch eine Untersuchung der Späne gezeigt wurde, tritt bei dreidimensionalen Prozessen neben der Hauptsegmentierung eine sekundäre Segmentierung auf, wodurch

*Korrespondenzautor: Daniel Diaz Ocampo, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industrielle

Informationstechnik (IIT), E-Mail: daniel.diaz-ocampo@kit.edu

Michael Heizmann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industrielle Informationstechnik (IIT)

German Gonzalez, Frederik Zanger, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Produktionstechnik (wbk)

ein wesentlich komplexeres Signal entsteht. Zusätzlich werden die Vibrationen aus der Maschine, die beispielsweise durch den Antrieb hervorgerufen werden, zum Sensor übertragen. Durch Reflexionen des Körperschalls im Werkzeughalter wird das Signal zusätzlich verzerrt. Da die Sensoren einen starken Bandpasscharakter aufweisen, werden konstante Anteile des Signals gefiltert und es entsteht ein Signal wie es beispielhaft in Abbildung 1 zu sehen ist. Die Sprünge

Abb. 1: Beispiel des Verlaufs eines Körperschallsignals im Schnittpunktprozess.

werden durch plötzliche Kraftänderungen hervorgerufen. Es ist eine starke Periodizität des Signals zu erkennen, die jedoch eine hohe Varianz bzgl. der Zeit aufweist. Das Ziel vieler Methoden zur Analyse des orthogonalen Schnittpunktprozesses ist es, das Signal über diese Periodizität mithilfe von Methoden, die auf der Fourier-Transformation basieren, zu charakterisieren. Diese Methoden haben jedoch, wie in Abschnitt 3 gezeigt wird, einige Nachteile. Außerdem wird dabei implizit das Signal mit einer harmonischen Schwingung verglichen, wohingegen die vorhandenen Körperschallsignale stark unharmonisch sind. Daher wird im Folgenden eine Methode vorgestellt, welche das Zeitsignal direkt analysiert.

2 Nulldurchgangs-Methode

Die starken Sprünge der Körperschallsignale können genutzt werden, um die Periodizität der Signale und damit die auftretenden Frequenzen zu schätzen, indem der Abstand zwischen den Nulldurchgängen gemessen wird. Zuerst wird das Signal mit einem Hochpassfilter mittelwertbefreit, um mögliche Fehler durch eine Offset-Drift zu vermeiden. Das zeitdiskrete mittelwertbefreite Signal

$$s'[n] = s[n] - s[n] * w[n] \quad (1)$$

wird berechnet, indem der gleitende Mittelwert mithilfe der Faltung der Fensterfunktion $w[n]$ mit dem Signal

approximiert und vom Signal abgezogen wird. Für die Koeffizienten der Fensterfunktion der Länge M_w muss dabei $\sum_{n=0}^{M_w-1} w[n] = 1$ gelten. Anschließend kann die gesuchte Periodizität bestimmt werden, indem die Nulldurchgänge des diskreten Signals interpoliert und deren Abstände berechnet werden. Ein Nulldurchgang kann in einem Signal erkannt werden, indem durch

$$n_z = \arg \max_{n \in \mathbb{N}} (\text{sgn}(s[n+1]) - \text{sgn}(s[n])) \quad (2)$$

die Signalsamples mit anschließendem Vorzeichenwechsel vom negativen in den positiven Wertebereich berechnet werden. Die Subtraktion des Signals vom um ein Sample verschobenen Signal liefert eine Funktion, die an positiven Vorzeichenwechseln den Wert 2 annimmt und bei den negativen Vorzeichenwechseln den Wert -2 . Wird anstelle der Argumente der Maxima die Argumente der Minima verwendet, werden für die anschließenden Berechnungen die negativen Nulldurchgänge verwendet. Durch eine entsprechende Betragsbildung lassen sich auch die Abstände zwischen den positiven und negativen Nulldurchgängen verwenden. Dabei müssen die im weiteren Verlauf zu berechnenden Zeitabstände mit dem Faktor 2 multipliziert werden, da eine Periode einen positiven sowie einen negativen Nulldurchgang umfasst. Der genaue Zeitpunkt des Nulldurchgangs kann anschließend durch

$$t_z = \frac{-s[n_z]}{f_s(s[n_z+1] - s[n_z])} + t_{n_z} \quad (3)$$

interpoliert werden, mit der Abtastfrequenz f_s . Um aus den interpolierten Nulldurchgängen eine Frequenz zu schätzen, muss der inverse zeitliche Abstand

$$\hat{f}[z] = \frac{1}{t_{z+1} - t_z} \quad (4)$$

zwischen zwei benachbarten Nulldurchgängen berechnet werden. Das so gewonnene Merkmal kann für den gesamten Schnittpunktprozess für eine statistische Auswertung in einem Histogramm wie in Abbildung 2 dargestellt werden. Um eine korrekte Darstellung des Histogramms zu erzeugen, sind die Grenzen der Klassengrenzen nicht einheitlich zu wählen, da es ansonsten durch die Inverse der Frequenzschätzung zu einer Überbewertung von niedrigen Frequenzen kommen kann. Da die Segmentspanbildungsfrequenz über den Prozess variieren kann, müssen die Einzelschätzungen zu einem zeitvarianten Merkmal zusammengefasst werden. Die Schätzung der momentanen Frequenz liegt dabei nicht zu äquidistanten Zeitpunkten vor, sondern kann lediglich dem Bereich zwischen zwei Nulldurchgängen zugeordnet werden. Außerdem weist die so geschätzte Frequenz, wie in Abbildung 2 erkennbar, eine sehr hohe Varianz auf, da im ursprünglichen Signal, durch

Abb. 2: Histogramm der inversen Nulldurchgänge bei einem beispielhaften Signal eines Körperschallsignals im Schnittprozess.

z.B. Reflexionen des Körperschalls im Werkzeughalter, vereinzelte Ausreißer auftreten und somit fälschlicherweise einen Nulldurchgang verursachen. Daher kann die Schätzung der Segmentspanbildungsfrequenz

$$\hat{f}_{AE}(t) = \text{med} \left(\left\{ \hat{f}[z] \mid |t_z| < t + \frac{T_M}{2} \right\} \right) \quad (5)$$

zu einem Zeitpunkt t durch den Median aus den Einzelschätzungen der Zeitpunkte, die im Intervall $t \pm \frac{T_M}{2}$ enthalten sind, berechnet werden. Da der Median nicht immer geeignet ist, das Argument des Maximums des Histogramms zu approximieren, kann als Schätzung der Segmentspanbildungsfrequenz direkt dieses Argument des Maximums verwendet werden. Dieses Merkmal ist jedoch, wie in Abschnitt 3 gezeigt wird, störungsanfälliger als der Median. Das Histogramm wird aus den Einzelschätzungen der Periodizität im Intervall $t \pm \frac{T_H}{2}$ erstellt, wobei die Anzahl der Histogrammklassen konstant gehalten wird und die Klassen äquidistant zwischen dem minimalen und dem maximalen Abstand der Nulldurchgänge aufgeteilt werden. Im Anschluss wird die Mittenfrequenz der Histogrammkategorie als Schätzwert für die Segmentspanbildungsfrequenz ausgewählt, welche die meisten Werte enthält, und, um eine Frequenz als Schätzgröße zu bekommen, invertiert.

3 Vergleich

In [5] werden Körperschallsignale mithilfe von Methoden analysiert, welche auf der Fourier-Transformation basieren. Daher soll die Nulldurchgangsmethode mit dem Periodogramm verglichen werden. Die Signale besitzen eine Abtastfrequenz von $f_s = 1$ MHz. Für die Fensterfunktion des Periodogramms wurde eine Gauß-Funktion der Länge $T_\gamma = 10$ ms mit $\sigma_{\text{gamma}} = T/6$ verwendet. Bei der Null-

durchgangsmethode wird ein Rechteckfenster der Länge $M_w = 10000$ eingesetzt.

In Abbildung 3 ist ein Vergleich zwischen dem Periodogramm und dem Histogramm der aus den Nulldurchgängen geschätzten Frequenzen dargestellt. Aus der Un-

Abb. 3: Vergleich zwischen Periodogramm $|P(f)|$ und Histogramm H_f der inversen Nulldurchgänge bei einem beispielhaften Signal eines Körperschallsignals im Schnittprozess. Die Prozessparameter sind Schnittgeschwindigkeit $v_c = 120$ m/min, Einstellwinkel $\kappa_r = 75^\circ$, Zustellung $a_p = 0,3$ mm und Vorschub $f_v = 0,2$ mm.

tersuchung der im Prozess entstanden Späne, wie es in [5] beschrieben wird, ist bekannt, dass die Segmentspanbildungsfrequenz bei den Prozessparametern dieses Versuches bei $f_{AE} \approx 16,7$ kHz liegt, wobei die Unsicherheit der Schätzung der Spanstauchung berücksichtigt werden muss. Das Histogramm weist bei ca. 14 kHz hohe Werte auf, wohingegen im Periodogramm bei 13,1 kHz eine deutliche Frequenzspitze zu erkennen ist. In beiden Methoden ist bei diesen Prozessparametern die Hauptsegmentierung gut erkennbar. Im Periodogramm treten jedoch unterhalb von 10 kHz weitere Frequenzspitzen auf, die im Histogramm nicht vorkommen. Diese werden durch Offsetdrifts des Sensorsignals hervorgerufen, die bei der Nulldurchgangsmethode gefiltert werden, im Periodogramm jedoch mit abgebildet werden. Sie sind insbesondere bei hoher und stark variierender Segmentspanbildungsfrequenz teilweise stärker als der Einfluss der Segmentierung. Die Nebensegmentierung ist im Histogramm durch hohe Werte im Frequenzbereich ab 23 kHz und im Periodogramm durch eine Frequenzspitze bei 29 kHz deutlich zu erkennen. Es hat sich jedoch über die verschiedenen Versuche mit unterschiedlichen Prozessparametern gezeigt, dass im Periodogramm unabhängig von den Prozessparametern immer eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Frequenzspitze bei ca. 30 kHz auftritt. Diese Frequenzspitze kann bei ei-

nigen Prozessparametern als Störung angesehen werden und tritt im Histogramm nicht auf.

In Abbildung 4 sind das Histogramm und das Periodogramm eines Schnittprozesses mit identischen Prozessparametern bis auf einer höheren Schnittgeschwindigkeit abgebildet. Die Analyse der Späne ergab bei diesem Ver-

Abb. 4: Vergleich zwischen Periodogramm $|P(f)|$ und Histogramm H_f der inversen Nulldurchgänge bei einem beispielhaften Signal eines Körperschallsignals im Schnittprozess. Die Prozessparameter sind Schnittgeschwindigkeit $v_c = 200$ m/min, Einstellwinkel $\kappa_r = 75^\circ$, Zustellung $a_p = 0,3$ mm und Vorschub $f_v = 0,2$ mm.

such eine Segmentspanbildungsfrequenz von 24,9 kHz. An dieser Stelle sind wieder sowohl im Histogramm als auch im Periodogramm höhere Werte zu erkennen. Allerdings liegen in beiden Fällen die höchsten Werte bei 31 kHz beim Periodogramm bzw. 35 kHz beim Histogramm, was vermutlich durch eine deutlich stärkere Nebensegmentierung hervorgerufen wird. Es fällt außerdem auf, dass in beiden Vergleichen im Histogramm der Nulldurchgangsmethode die hohen Frequenzbereiche deutlich höher bewertet werden als im Periodogramm. Dies liegt daran, dass das Periodogramm eine über die Frequenz konstante Frequenzauflösung besitzt und somit niedrige Frequenzbänder eine höhere relative Bandbreite aufweisen. Bei der Darstellung des Histogramms der Nulldurchgangsmethode wird dieser Effekt durch die variablen Klassengrenzen vermieden.

Bei Versuchen im orthogonalen Schnitt wird, wie beispielsweise in [3], häufig die dominanteste Frequenz nach einer Fast-Fourier-Transformation als Segmentspanbildungsfrequenz angesehen. Daraus lässt sich eine zeitvariante Schätzung berechnen, indem, wie in Abbildung 5 dargestellt, das Argument des Maximums der Kurzzeit-Fourier-Transformation über die Frequenz gebildet wird. Zusätzlich sind die Verläufe der wie in Abschnitt 2 beschriebenen Merkmale, das Argument des Maximums des Histogramms und der Median, abgebildet. Das zugrunde liegen-

Abb. 5: Vergleich zwischen dem Argument des Maximums der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT), der Nulldurchgangsmethode mit anschließender Maximumssuche des Histogramms (ZC-Max) und der Nulldurchgangsmethode mit anschließender Medianbildung (ZC-Med). Es handelt sich dabei um dasselbe Sensorsignal wie in Abbildung 3.

de Körperschallsignal ist dasselbe wie das Sensorsignal von Abbildung 3. Um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Merkmale zu gewährleisten, wurde bei allen Methoden eine Fensterlänge von $T_M = T_H = T_{\text{STFT}} = 10$ ms verwendet. Es fällt auf, dass die Schätzung durch das Argument des Maximums der Kurzzeit-Fourier-Transformation zu vielen Zeitpunkten durch niedrige Frequenzen gestört wird, die keine realistische Schätzung ergeben und vermutlich durch Maschinengeräusche oder wie bereits erwähnt durch eine Offsetdrift hervorgerufen werden. Diese niedrigen Frequenzen stehen jedoch in keinerlei Zusammenhang mit der Segmentierung der Spanbildung. Im Gegensatz dazu ist bei dem Argument des Maximums des Histogramms der Nulldurchgangsmethode zu einigen Zeitpunkten eine deutlich zu hohe Schätzung zu erkennen, die höchstwahrscheinlich durch die Nebensegmentierung des dreidimensionalen Schnitts hervorgerufen wird. Der Median der Nulldurchgangsmethode liefert bei diesen Prozessparametern die robusteste Schätzung, auch wenn hier einzelne Ausreißer hin zu hohen Frequenzen zu erkennen sind.

Werden die zeitvarianten Merkmale auf das Körperschallsignal des Schnittprozesses aus Abbildung 4 angewandt, resultieren daraus die Verläufe, wie sie in Abbildung 6 abgebildet sind. Es ist klar zu erkennen, dass alle drei Merkmale zur Charakterisierung der Segmentierung einen deutlich zu hohen Schätzwert liefern, was vermutlich auf einen starken Einfluss der Nebensegmentierung zurückzuführen ist. Außerdem ist zu erkennen, dass der Median der Nulldurchgangsmethode gegen Ende des Schnittprozesses zu niedrigeren Frequenzwerten tendiert, wohingegen die beiden anderen Methoden diese Tendenz nicht so eindeutig widerspiegeln, was höchstwahrscheinlich an einer Verschiebung des Einflusses der Haupt- und Nebensegmen-

Abb. 6: Vergleich zwischen dem Argument des Maximums der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT), der Nulldurchgangsmethode mit anschließender Maximumssuche des Histogramms (ZC-Max) und der Nulldurchgangsmethode mit anschließender Medianbildung (ZC-Med). Die Prozessparameter sind Schnittgeschwindigkeit $v_c = 120$ m/min, Einstellwinkel $\kappa_r = 75^\circ$, Zustellung $a_p = 0,3$ mm und Vorschub $f_v = 0,2$ mm. Für eine bessere Anschaulichkeit wurde der angezeigte Bereich auf 65 kHz begrenzt, wodurch einzelne Schätzungen der Nulldurchgangsmethode mit anschließender Maximumssuche des Histogramms (ZC-Max), die teilweise über 100 kHz hinausgehen, nicht mehr dargestellt werden.

tierung liegt, welche die Maximumssuche nicht beeinflusst. Dieses Absinken der Segmentspanbildungsfrequenz kann durch den Verschleiß der Schneidkante verursacht werden und ist eine wichtige Einflussgröße auf die Segmentierung des Spans. Verschiedene Versuche haben gezeigt, dass die unterschiedlichen Verschleißarten wie Adhäsion, Abrasion oder Kolkverschleiß einen unterschiedlichen Einfluss auf die Segmentspanbildung haben, der in der Nulldurchgangsmethode mit Medianbildung widergespiegelt wird, auch wenn die Segmentspanbildungsfrequenz nicht immer korrekt geschätzt wird.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Schätzung der Segmentspanbildungsfrequenz vorgestellt, die anstatt mittels klassischer Frequenzanalyse das Signal im Zeitbereich analysiert. Dazu wird die Periodizität des Signals über den zeitlichen Abstand der Nulldurchgänge ermittelt und anschließend durch Inversion in eine Frequenz umgerechnet. Um die zeitliche Varianz der Segmentierung abzubilden, wurden mit dem Maximum des Histogramms und dem Median der inversen Abstände des Nulldurchgangs für ein bestimmtes zeitliches Signalintervall zwei Merkmale vorgestellt, welche die Segmentspanbildungsfrequenz schätzen. Beim Vergleich der Methode mit dem Maximum der Kurzzeit-Fourier-Transformation, wie es

beim orthogonalen Schnitt eingesetzt wird, konnte gezeigt werden, dass die Nulldurchgangsmethode im dreidimensionalen Schnitt wesentlich robuster gegenüber äußeren Störeinflüssen ist. Es wurde gezeigt, dass sich Methoden, die auf der Fourier-Transformation basieren, aufgrund der konstanten Bandbreite nicht gut zur Analyse von Körperschallsignalen eignen, bei denen es zu Nebensegmenten kommen kann, da diese zur Überbewertung von niedrigen Frequenzen neigen. Hier würden sich Methoden mit variabler Frequenzauflösung wie beispielsweise die Wavelet-Transformation anbieten. Der je nach Prozessparameter auftretende deutliche Einfluss der Nebensegmentierung führt in allen Methoden jedoch zu einem deutlich zu hohen Schätzergebnis. Hier ist noch ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Schätzung vorhanden.

Danksagung: Die wissenschaftliche Arbeit wurde von der DFG im Rahmen des Forschungsschwerpunktprogramms SPP 2086 gefördert. Die Autoren danken der DFG für die Förderung und die Unterstützung.

Literatur

- [1] J. Barry, G. Byrne und D. Lennon. Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(7):1055–1070, 2001.
- [2] X. Li. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(2):157–165, 2002. ISSN 0890-6955.
- [3] V. Nguyen, P. Fernandez-Zelaia und S. N. Melkote. PVDF sensor based characterization of chip segmentation in cutting of Ti-6Al-4V alloy. *CIRP Annals*, 66(1):73–76, 2017.
- [4] H. Ravindra, Y. Srinivasa und R. Krishnamurthy. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear*, 212(1):78–84, 1997. ISSN 0043-1648.
- [5] D. Schwär, G. González, E. Segebade, F. Zanger und M. Heizmann. Evaluation of the acoustic emission caused by the chip segmentation frequency during machining of titanium alloy. *tm - Technisches Messen*, 87(11):714–720, 2020. doi:10.1515/teme-2020-0056.
- [6] F. Zanger. *Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V*. PhD thesis, 2012.
- [7] F. Zanger, A. Kacaras, M. Bächle, M. Schwabe, F. Puente León und V. Schulze. Fem simulation and acoustic emission based characterization of chip segmentation frequency in machining of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP*, 72:1421–1426, 2018.